Б. Б. БУХОВЦЕВ, Ю. Л. КЛИМОНТОВИЧ, Г. Я. МЯКИШЕВ

ФИЗИКА

9

Вещество	Удельная теплота парообразования, кДж/кг
Вода	2260
Спирт (этиловый)	860
Кислота азотная	480
Эфир	360
Ртуть	290
Керосин	210

Вещество	Критическая температура, °С
Гелий	-268
Водород	-240
Азот	-147
Кислород	-118
Хлор	146
Эфир	194
Ртуть	1460

Материал	Модуль упругости, ГПа (при t=20°С)
Алюминий	70–71
Бетон	14,3–23,2
Гетинакс	10–18
Железо	190–210
Золото	79
Резина	0,9
Сталь	200–220
Титан	112

Температура, °С	Давление насыщенных паров воды, к Па
0	0,421
10	1,22
15	1,71
20	2,33
25	3,17
30	4,27
50	12,3
80	46,7
100	101,3

ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

ВВЕДЕНИЕ

Механическое движение. В VIII классе подробно изучалась механическая форма движения материи, т. е. перемещение в пространстве одних тел относительно других с течением времени. То, что все тела состоят из атомов или молекул, не принималось во внимание. Тела рассматривались как сплошные, лишенные внутренней структуры.

Исследование свойств тел не входит в задачу механики. Ее цель — определение положений тел в пространстве и их скоростей в любой момент времени в зависимости от сил взаимодействий между ними при заданных начальных положениях и скоростях тел.

Тепловое движение. Атомы и молекулы вещества, как вам известно из курса физики VII класса, совершают беспорядочное (хаотическое) движение, называемое тепловым движением. В разделе «Тепловые явления. Молекулярная физика» в IX классе мы будем изучать основные закономерности тепловой формы движения материи.

Движение молекул беспорядочно в связи с тем, что число их в телах, которые нас окружают, необозримо велико и молекулы взаимодействуют друг с другом. Понятие теплового движения не применимо к системам из нескольких молекул. Хаотическое движение огромного числа молекул качественно отличается от упорядоченного механического перемещения отдельных тел. Именно поэтому оно представляет собой особую форму движения материи, обладающую специфическими свойствами.

Тепловое движение обусловливает внутренние свойства тел, и его изучение позволяет понять многие физические процессы, протекающие в телах.

Макроскопические тела. В физике тела, состоящие из очень большого числа атомов или молекул, называют макроскопическими. Размеры макроскопических тел во много раз превышают размеры атомов. Газ в баллоне, вода в стакане, песчинка, камень, стальной стержень, земной шар — все это примеры макроскопических тел (рис. 1).

Мы будем рассматривать процессы в макроскопических телах.

Тепловые явления. Тепловое движение молекул зависит от температуры. Об этом говорилось в курсах физики VI и VII классов. Следовательно, изучая тепловое движение молекул, мы тем самым будем изучать явления, зависящие от температуры тел. При нагревании происходят переходы вещества из одного со-

стояния в другое: твердые тела превращаются в жидкости, а жидкости — в газы. При охлаждении, наоборот, газы превращаются в жидкости, а жидкости — в твердые тела.

Эти и многие другие явления, обусловленные хаотическим движением атомов и молекул, называют тепловыми явлениями.

Значение тепловых явлений. Тепловые явления играют огромную роль в жизни людей, животных и растений. Изменение температуры воздуха на 20—30°С при смене времени года меняет все вокруг нас. С наступлением весны природа пробуждается, леса одеваются листвой, зеленеют луга. Зимой же богатые летние краски заменяются однообразным белым фоном, жизнь растений и многих насекомых замирает. При изменении температуры нашего тела всего лишь на один градус мы уже чувствуем недомогание.

Тепловые явления интересовали людей с древнейших времен. Люди добились относительной независимости от окружающих условий после того, как научились добывать и поддерживать огонь. Это было одним из величайших открытий, сделанных человеком.

Изменение температуры оказывает влияние на все свойства тел. Так, при нагревании или охлаждении изменяются размеры твердых тел и объем жидкостей. Значительно меняются также их механические свойства, например упругость. Кусок резиновой трубки не пострадает, если ударить по нему молотком. Но при охлаждении до температуры ниже — 100°С резина становится хрупкой, как стекло. От легкого удара резиновая трубка разбивается на мелкие кусочки. Лишь после нагревания резина вновь обретет свои упругие свойства.

Все перечисленные выше и многие другие тепловые явления подчиняются определенным законам. Эти законы так же точны и надежны, как и законы механики, но отличаются от них по содержанию и форме. Открытие законов, которым подчиняются тепловые явления, позволяет с максимальной пользой применять эти явления на практике, в технике. Современные тепловые двигатели, установки для сжижения газов, холодильные аппараты и другие устройства конструируют на основе знания этих законов.

Рис. 1

Ломоносов Михаил Васильевич (1711—1765) — великий русский ученый, энциклопедист, поэт и общественный деятель, основатель Московского университета, носящего его имя. Пушкин назвал М. В. Ломоносова «первым русским университетом». М. В. Ломоносову принадлежат выдающиеся труды по физике, химии, горному делу и металлургии. Он развил молекулярно-кинетическую теорию тепла, в его работах предвосхищены законы сохранения массы и энергии. М. В. Ломоносов создал фундаментальные труды по истории русского народа, он является основоположником современной русской грамматики.

Молекулярно-кинетическая теория. Теория, объясняющая тепловые явления в макроскопических телах и внутренние свойства этих тел на основе представлений о том, что *все тела состоят из отдельных хаотически движущихся частиц,* носит название *молекулярно-кинетической теории.* В теории ставится задача связать закономерности поведения отдельных молекул с величинами, характеризующими свойства макроскопических тел.

Еще философы древности догадывались о том, что теплота — это вид внутреннего движения частиц, слагающих тела. Большой вклад в развитие молекулярно-кинетической теории был сделан великим русским ученым М. В. Ломоносовым. Ломоносов рассматривал теплоту как вращательное движение частиц вещества. С помощью своей теории он дал вполне правильное в общих чертах объяснение явлений плавления, испарения и теплопроводности. Им был сделан вывод о существовании «наибольшей или последней степени холода», когда движение частичек вещества прекращается.

Однако трудности построения молекулярно-кинетической теории привели к тому, что окончательную победу она одержала лишь в начале XX в. Дело в том, что число молекул в макроскопических телах огромно и проследить за движением каждой молекулы невозможно. Необходимо научиться на основе законов движения отдельных молекул находить тот средний результат, к которому приводит их совокупное движение. Именно этот средний результат движения всех молекул определяет тепловые явления в макроскопических телах.

Термодинамика. Вещество обладает многими свойствами, которые можно изучать, не углубляясь в его строение. Тепловые явления можно описывать с помощью величин, регистрируемых такими приборами, как манометр и термометр, которые не реагируют на воздействие отдельных молекул.

В середине XIX в. после открытия закона сохранения энергии была построена первая научная теория тепловых процессов — термодинамика. **Термодинамика — это теория тепловых явлений, в которой не учитывается молекулярное строение тел.** Она возникла при изучении оптимальных условий использования теплоты для совершения работы задолго до того, как молекулярно-кинетическая теория получила всеобщее признание.

Термодинамика и статистическая механика. В настоящее время в науке и в технике используют как термодинамику, так и молекулярно-кинетическую теорию, называемую также статистической механикой. Эти теории взаимно дополняют друг друга.

Все содержание термодинамики заключается в нескольких утверждениях, называемых законами термодинамики. Эти законы установлены опытным путем. Они справедливы для всех веществ, независимо от их внутреннего строения. Статистическая механика — более глубокая, но зато и более сложная теория тепловых явлений. С ее помощью можно обосновать теоретически все законы термодинамики.

Вначале мы остановимся на основных положениях молекулярно-кинетической теории, известных нам частично из курса физики VI и VII классов. Затем познакомимся с количественной молекулярно-кинетической теорией простейшей системы — газа сравнительно небольшой плотности.

Глава I.
ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ. РАЗМЕРЫ МОЛЕКУЛ

В основе молекулярно-кинетической теории строения вещества лежат три положения, каждое из которых доказано с помощью опытов: **вещество состоит из частиц; эти частицы хаотически движутся; частицы взаимодействуют друг с другом.**

Свойства и поведение тел, начиная от разреженных газов верхних слоев атмосферы и кончая твердыми телами на Земле, а также сверхплотными ядрами планет и звезд, определяются движением взаимодействующих друг с другом частиц, из которых состоят все тела,— молекул, атомов[1] или еще более малых образований — элементарных частиц.

[1] Напомним: атом — наименьшая частица химического элемента, носитель его свойств; молекула — наименьшая устойчивая частица вещества, обладающая его химическими свойствами; молекулы образуются из атомов.

Оценка размеров молекул. Для полной уверенности в реальности существования молекул необходимо определить их размеры.

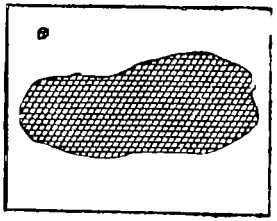


Рис. 2

Рассмотрим сравнительно простой метод оценки размеров молекул. Известно, что нельзя заставить капельку оливкового масла объемом 1 мм^3 расплыться на поверхности воды так, чтобы она заняла площадь более 0,6 м^2. Можно предположить, что при растекании масла по максимальной площади оно образует слой толщиной всего лишь в одну молекулу. Толщину этого слоя нетрудно определить и тем самым оценить размеры молекулы оливкового масла.

Разрежем мысленно кубик объемом 1 мм^3 на квадратные слои по 1 мм^2 площади каждый так, чтобы ими можно было покрыть площадь 0,6 м^2 (рис. 2). Число таких слоев будет равно: $\frac{0{,}6\,м^2}{0{,}000001\,м^2} = 6 \cdot 10^5$. Толщину слоя масла, а следовательно, и размер молекулы оливкового масла можно найти, разделив ребро куба в 0,1 см на число слоев: $\frac{0{,}1\ см}{6 \cdot 10^5} \approx 1{,}7 \cdot 10^{-7}$ см.

Ионный проектор. В настоящее время перечислять всевозможные способы доказательства существования атомов и молекул нет необходимости. Современные приборы позволяют наблюдать изображения отдельных атомов и молекул. В учебнике физики для VI класса приведена фотография, полученная с помощью электронного микроскопа, на которой можно видеть расположение отдельных атомов на поверхности кристалла золота.

Но электронный микроскоп — очень сложное устройство. Мы познакомимся с гораздо более простым прибором, позволяющим получать изображения отдельных атомов и оценивать их размеры. Этот прибор называется ионным проектором или ионным микроскопом. Устроен он следующим образом: в центре сферического сосуда радиусом около 10 см расположено острие вольфрамовой иглы (рис. 3). Радиус кривизны острия делают настолько малым, насколько это возможно при современной технике обработки металлов,— около $5 \cdot 10^{-6}$ см. Внутреннюю поверхность сферы покрывают тонким проводящим слоем, способным, подобно экрану телевизионной трубки, светиться под действием ударов быстрых частиц. Между положительно заряженным острием и отрицательно заряженным проводящим слоем создают напряжение в несколько сотен вольт. Сосуд заполняют гелием при малом давлении 100 Па (0,75 мм рт. ст.).

Атомы вольфрама на поверхности острия образуют микроскопические «бугорки» (рис. 4). При сближении хаотически дви-

Рис. 3

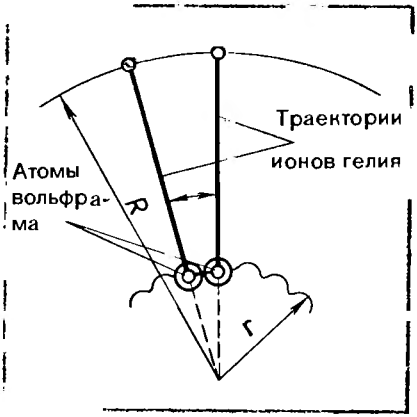
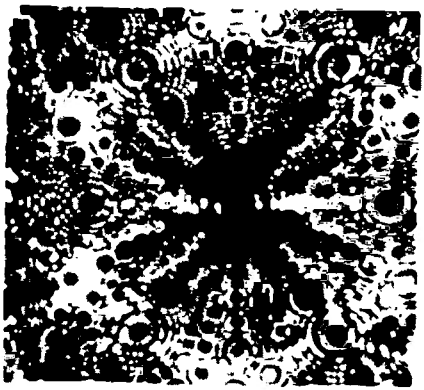


Рис. 4

Рис. 5



жущихся атомов гелия с атомами вольфрама электрическое поле, особенно сильное вблизи атомов на поверхности острия, отрывает электроны у атомов гелия и превращает эти атомы в ионы. Ионы гелия отталкиваются от положительно заряженного острия и с большой скоростью движутся вдоль радиусов сферы. Сталкиваясь с поверхностью сферы, ионы вызывают ее свечение. В результате на экране возникает увеличенная картина расположения атомов вольфрама на острие (рис. 5). Светлые пятнышки на экране — это изображения отдельных атомов.

Увеличение проектора — отношение расстояния между изображениями атомов к расстоянию между самими атомами — оказывается равным отношению радиуса сосуда к радиусу острия и достигает двух миллионов. Именно поэтому удается видеть отдельные атомы.

Диаметр атома вольфрама, определяемый с помощью ионного проектора, оказывается равным приблизительно $2 \times \times 10^{-8}$ см. Размеры атомов, найденные другими методами, оказываются примерно такими же. Размеры молекул, состоящих из многих атомов, естественно, больше.

Но все же эти размеры так малы, что их невозможно себе представить. Что вам может сказать, например, число $2{,}3 \times \times 10^{-8}$ см — размер молекулы водорода? В таких случаях прибегают к помощи сравнений. Вот одно из них. Если ручку, которой вы пишете, увеличить так, чтобы она доставала от

Земли до Луны, то молекула водорода при том же увеличении примет размеры ручки.

Число молекул. При очень малых размерах молекул число их в любом макроскопическом теле огромно. Подсчитаем приближенно число молекул в капле воды массой 1 г и, следовательно, объемом 1 см^3. Диаметр молекулы воды равен примерно $3 \cdot 10^{-8}$ см. Считая, что каждая молекула воды при плотной упаковке молекул занимает объем $(3 \cdot 10^{-8}$ см$)^3$, можно найти число молекул в капле, разделив объем капли (1 см^3) на объем, приходящийся на одну молекулу:

$$N = \frac{1}{(3 \cdot 10^{-8})^3} \approx 3{,}7 \cdot 10^{22}.$$

При каждом вдохе вы захватываете в легкие столько молекул, что если бы все они после выдоха равномерно распределились в атмосфере Земли, то каждый житель планеты при вдохе получил бы две молекулы, побывавшие в ваших легких.

2. МАССА МОЛЕКУЛ. ПОСТОЯННАЯ АВОГАДРО

Масса молекулы воды. Массы отдельных молекул и атомов очень малы. Например, в 1 г воды содержится $3{,}7 \cdot 10^{22}$ молекул. Следовательно, масса одной молекулы равна:

$$m_{0H_2O} \approx \frac{1}{3{,}7 \cdot 10^{22}} \text{г} \approx 3 \cdot 10^{-23} \text{ г}. \qquad (1.1)$$

Массу такого же порядка имеют и молекулы других веществ, исключая огромные молекулы органических веществ.

Относительная молекулярная масса. Так как массы молекул очень малы, удобно использовать в расчетах не абсолютные значения масс, а относительные. По международному соглашению (как вам известно из курса химии VII класса) массы всех атомов и молекул сравнивают с $\frac{1}{12}$ массы атома углерода (так называемая углеродная шкала атомных масс)[1]. **Относительной молекулярной (или атомной) массой вещества M_r называют отношение массы молекулы (или атома) m_0 данного вещества к $\frac{1}{12}$ массы атома углерода m_{0C}:**

$$M_r = \frac{m_0}{{}^1/_{12}\, m_{0C}}. \qquad (1.2)$$

[1] Сравнение масс атомов и молекул именно с $\frac{1}{12}$ массы атома углерода обусловлено тем, что в этом случае относительные массы атомов оказываются наиболее близкими к целым числам. Таким образом, в углеродной шкале атомных масс масса атома углерода принимается строго равной 12. Это примерно в 12 раз больше массы самого легкого атома — атома водорода.

В настоящее время относительные атомные массы всех химических элементов весьма точно измерены. Складывая относительные атомные массы атомов, входящих в состав молекулы, можно вычислить относительную молекулярную массу. Так, например, относительная молекулярная масса углекислого газа CO_2 приблизительно равна 44, так как относительная атомная масса углерода равна 12, а кислорода — примерно 16: $12+2\cdot16=44$.

Количество вещества. Чем больше атомов или молекул в макроскопическом теле, тем, очевидно, больше вещества содержится в данном теле. Число молекул в макроскопических телах огромно. Поэтому удобно указывать не абсолютное число атомов или молекул, а относительное.

Принято сравнивать число молекул или атомов в данном теле с числом атомов в 0,012 кг углерода. Относительное число атомов или молекул в теле характеризуется особой физической величиной, называемой количеством вещества. **Количеством вещества ν называют отношение числа молекул N в данном теле к числу N_A атомов в 0,012 кг углерода**[1]:

$$\nu=\frac{N}{N_A}. \tag{1.3}$$

Зная количество вещества ν и число N_A, мы тем самым знаем число N молекул в веществе. Количество вещества выражают в молях. **Моль — количество вещества, содержащего столько же молекул, сколько содержится атомов в 0,012 кг углерода.** Если количество вещества равно, например, 2,5 моль, то это означает, что число молекул в теле в 2,5 раза превышает число атомов в 0,012 кг углерода.

Постоянная Авогадро. Число молекул или атомов N_A в моле вещества называют постоянной Авогадро, в честь итальянского ученого XIX в. Согласно определению моля постоянная Авогадро одинакова для всех веществ. Она равна, в частности, числу атомов в моле углерода, т. е. в 0,012 кг углерода.

Для определения постоянной Авогадро надо найти массу одного атома углерода (или любого другого атома). Грубая оценка массы может быть произведена так, как это было сделано выше для массы молекулы воды (наиболее точные методы основаны на отклонении пучков ионов электромагнитным полем). Измерения дают для массы атома углерода: $m_{0c}=1{,}995\cdot10^{-26}$ кг. Отсюда постоянная Авогадро равна:

$$N_A=N\frac{1}{\nu}=\frac{0{,}012\ \text{кг}}{m_{0c}}\frac{1}{\text{моль}}=\frac{0{,}012}{1{,}995\cdot10^{-26}}\frac{1}{\text{моль}}=6{,}02\cdot10^{23}\ \text{моль}^{-1}. \tag{1.4}$$

[1] Если вещество состоит из отдельных атомов, не объединенных в молекулы, то здесь и в дальнейшем под числом молекул надо подразумевать число атомов.

Наименование моль$^{-1}$ указывает, что N_A — число атомов любого вещества, взятого в количестве одного моля. Если количество вещества $\nu = 2{,}5$ моль, то число молекул в теле $N = \nu N_A \approx 1{,}5 \cdot 10^{24}$

Существует много других методов определения постоянной Авогадро, не связанных с нахождением масс атомов. Все они приводят к одним и тем же результатам. Постоянная Авогадро играет важнейшую роль во всей молекулярной физике и является универсальной постоянной.

Огромная величина постоянной Авогадро показывает, насколько малы микроскопические масштабы по сравнению с макроскопическими: тело, обладающее количеством вещества 1 моль, имеет привычные для нас макроскопические размеры.

Молярная масса. Наряду с относительной молекулярной массой M_r в физике и химии широко используется молярная масса M. **Молярной массой называют массу вещества, взятого в количестве одного моля.**

Согласно этому определению молярная масса равна произведению массы молекулы на постоянную Авогадро:

$$\boxed{M = m_0 N_A} \qquad (1.5)$$

Молярную массу M можно выразить через относительную молекулярную массу. Подставляя в (1.5) выражения m_0 из (1.2) и N_A из (1.4), получим:

$$M = M_r \frac{m_{0C}}{12} \cdot \frac{0{,}012 \text{ кг/моль}}{m_{0C}} = 10^{-3} \, M_r \text{ кг/моль}. \qquad (1.6)$$

Так, например, молярная масса углекислого газа CO_2 равна 0,044 кг/моль, так как относительная молекулярная масса углекислого газа приближенно равна 44.

Масса m любого количества вещества ν, равная произведению массы одной молекулы m_0 на число молекул N, выражается через молярную массу и количество вещества так:

$$m = m_0 N = m_0 N_A \nu = M\nu, \qquad (1.7)$$

поскольку $N = \nu N_A$ (формула 1.3).

Так, масса 3 моль углекислого газа равна: $m = 3$ моль $\times$ $\times 0{,}044$ кг/моль $= 0{,}132$ кг.

1. Перечислите основные положения молекулярно-кинетической теории. **2.** Приведите известные вам доказательства существования молекул. **3.** Что называют относительной молекулярной массой? **4.** Чему равна относительная молекулярная масса воды? **5.** Что называют количеством вещества? **6.** Дайте определение единицы количества вещества — моля. **7.** Чему равна постоянная Авогадро? **8.** Дайте определение молярной массы. **9.** Какова связь между массой тела и количеством вещества в нем? **10.** Выразите число молекул в теле через его массу, молярную массу и постоянную Авогадро.

3. БРОУНОВСКОЕ ДВИЖЕНИЕ.

В VI классе вы познакомились с диффузией — перемешиванием газов, жидкостей и твердых тел при непосредственном контакте. Это явление можно объяснить беспорядочным движением молекул. Но самое очевидное доказательство движения молекул можно получить, наблюдая в микроскоп мельчайшие взвешенные в воде частицы какого-либо твердого вещества. Эти частицы совершают беспорядочное движение, которое называют броуновским.

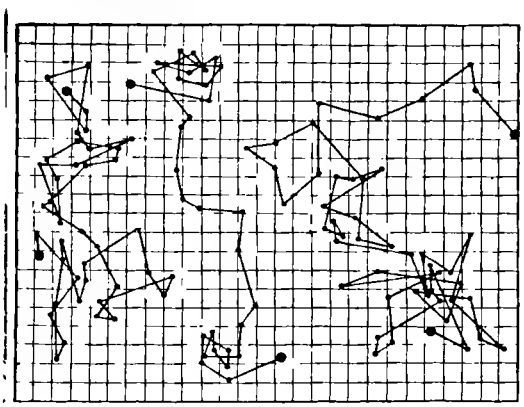
Броуновское движение — это тепловое движение взвешенных в жидкости (или газе) частиц.

Наблюдение броуновского движения. Английский ботаник Броун впервые наблюдал это явление в 1827 г., рассматривая в микроскоп взвешенные в воде споры плауна. Сейчас обычно используют частички краски гуммигут, нерастворимой в воде. Эти частички совершают хаотическое движение. Самым поразительным и непривычным является то, что это движение никогда не прекращается. Мы ведь привыкли к тому, что любое движущееся тело рано или поздно останавливается. *Броуновское движение — тепловое движение, и оно не может прекратиться.* С увеличением температуры интенсивность его растет. На рисунке 6 приведена схема движения броуновских частиц. Положения частиц, отмеченные точками, определены через равные промежутки времени — 30 с. Эти точки соединены прямыми линиями. В действительности траектории частиц гораздо сложнее.

Броуновское движение можно наблюдать в газе. Его совершают взвешенные в воздухе частицы пыли или дыма.

В настоящее время понятие «броуновское движение» используется в более широком смысле. Так, например, броуновским

Рис. 6



движением является дрожание стрелок чувствительных измерительных приборов. Оно происходит из-за теплового движения атомов деталей приборов и окружающей среды.

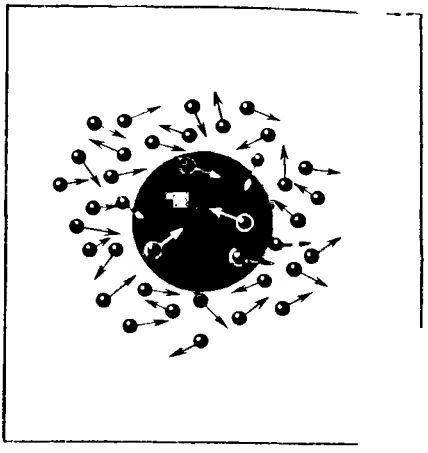


Рис. 7

Объяснение броуновского движения. Объяснение броуновского движения может быть дано только на основе молекулярно-кинетической теории. Причина броуновского движения частицы в том, что удары молекул о нее не компенсируют друг друга. На рисунке 7 схематически показано положение одной броуновской частицы и ближайших к ней молекул. При хаотическом движении молекул импульсы, передаваемые ими броуновской частице, например слева и справа, неодинаковы. Поэтому отлична от нуля результирующая сила давления, которая и вызывает изменение движения броуновской частицы.

Среднее давление имеет определенное значение как в газе, так и в жидкости. Но всегда происходят незначительные случайные отклонения от среднего. Чем меньше площадь тела, тем значительнее относительные изменения силы давления, действующей на данную площадь. Так, если площадка имеет размеры порядка нескольких диаметров молекулы, то действующая на нее сила меняется скачкообразно от нуля до некоторого значения при попадании молекулы в эту площадку.

Молекулярно-кинетическая теория броуновского движения была создана А. Эйнштейном в 1905 г. Построение теории броуновского движения и ее экспериментальное подтверждение французским физиком Ж. Перреном окончательно завершили победу молекулярно-кинетической теории.

4. СИЛЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОЛЕКУЛ

Молекулярные силы. Между молекулами вещества существуют силы взаимодействия, называемые молекулярными силами. Если бы между молекулами не было сил притяжения, то все вещества при любых условиях находились бы только в газообразном состоянии. Лишь благодаря силам притяжения молекулы удерживаются друг возле друга и образуют жидкие и твердые тела.

Однако одни только силы притяжения не могут обеспечить существование устойчивых образований из атомов и молекул. На

очень малых расстояниях между молекулами действуют силы отталкивания.

Строение атомов и молекул. Атом, а тем более молекула,— это сложная система, состоящая из отдельных заряженных частиц — электронов и атомных ядер. Хотя в целом молекулы электрически нейтральны, между ними на малых расстояниях действуют значительные электрические силы. Происходит взаимодействие между электронами и ядрами соседних молекул. Описание движения частиц внутри атомов и молекул и сил взаимодействия между молекулами — очень сложная задача. Ее рассматривают в атомной физике. Мы приведем только результат: примерную зависимость силы взаимодействия двух молекул от расстояния между ними.

Атомы и молекулы состоят из заряженных частиц противоположных знаков заряда. Между электронами одной молекулы и атомными ядрами другой действуют силы притяжения. Одновременно между электронами обеих молекул и между их ядрами действуют силы отталкивания.

Вследствие электрической нейтральности атомов и молекул молекулярные силы являются короткодействующими. На расстояниях, превышающих размеры молекул в несколько раз, силы взаимодействия между ними практически не сказываются.

Зависимость молекулярных сил от расстояния между молекулами. Рассмотрим, как меняется в зависимости от расстояния между молекулами проекция силы взаимодействия между ними на прямую, соединяющую центры молекул. На расстояниях, превышающих 2—3 диаметра молекул, сила отталкивания практически равна нулю. Заметна лишь сила притяжения. По мере уменьшения расстояния сила притяжения возрастает и одновременно начинает сказываться сила отталкивания. Эта сила очень

Рис. 8

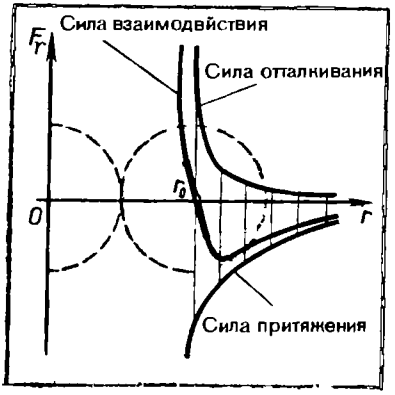
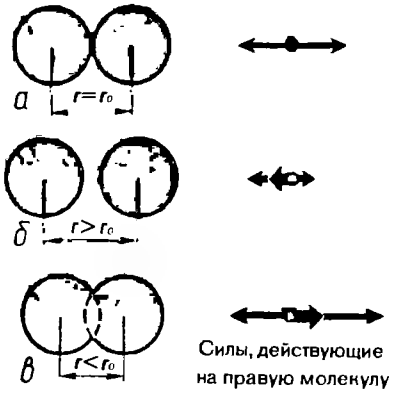


Рис. 9



быстронарастает, когда электронные оболочки атомов начинают перекрываться. В результате на сравнительно больших расстояниях молекулы притягиваются, а на малых отталкиваются.

На рисунке 8 изображена примерная зависимость проекции силы отталкивания от расстояния между центрами молекул (верхняя кривая), проекции силы притяжения (нижняя кривая) и проекции результирующей силы (средняя кривая). Проекция силы отталкивания положительна, а проекция силы притяжения отрицательна. Тонкие вертикальные линии проведены для удобства выполнения сложения проекций сил.

На расстоянии r_0, равном примерно сумме радиусов молекул, проекция результирующей силы $F_r=0$, так как сила притяжения равна по модулю силе отталкивания (рис. 9, *а*). При $r>r_0$ сила притяжения превосходит силу отталкивания и проекция результирующей силы (жирная стрелка) отрицательна (рис. 9 *б*). Если $r\to\infty$, то $F_r\to 0$. На расстояниях $r<r_0$ сила отталкивания превосходит силу притяжения (рис. 9, *в*).

Происхождение сил упругости. Зависимость сил взаимодействия молекул от расстояния между ними объясняет появление силы упругости при сжатии и растяжении тел. Если пытаться сблизить молекулы на расстояние, меньшее r_0, то начинает действовать сила, препятствующая сближению. Наоборот, при удалении молекул друг от друга действует сила притяжения, возвращающая молекулы в исходное положение после прекращения внешнего воздействия.

При малом смещении молекул из положений равновесия силы притяжения или отталкивания растут линейно с увеличением смещения. На малом участке кривую можно считать отрезком прямой (утолщенный участок кривой на рис. 8). Именно поэтому при малых деформациях оказывается справедливым закон Гука, согласно которому сила упругости пропорциональна деформации. При больших смещениях молекул закон Гука уже несправедлив.

Так как при деформации тела изменяются расстояния между всеми молекулами, то на долю соседних слоев молекул приходится незначительная часть общей деформации. Поэтому закон Гука выполняется при деформациях, в миллионы раз превышающих размеры молекул.

5. СТРОЕНИЕ ГАЗООБРАЗНЫХ, ЖИДКИХ И ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Молекулярно-кинетическая теория дает возможность понять, почему вещество может находиться в газообразном, жидком и твердом состояниях.

Газ. В газах расстояние между атомами или молекулами в среднем во много раз больше размеров самих молекул (рис. 10). Например, при атмосферном давлении объем сосуда в десятки

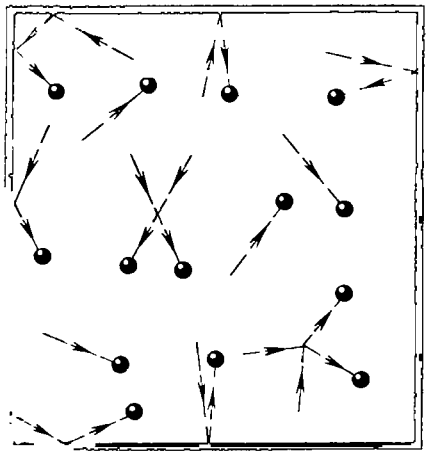


Рис. 10

тысяч раз превышает объем находящихся в сосуде молекул газа.

Газы легко сжимаются, так как при сжатии газа уменьшается лишь среднее расстояние между молекулами, но молекулы не «сдавливают» друг друга (рис. 11).

Молекулы с огромными скоростями — сотни метров в секунду — движутся в пространстве. Сталкиваясь, они отскакивают друг от друга в разные стороны подобно бильярдным шарам.

Слабые силы притяжения молекул газа не способны удержать их друг возле друга. Поэтому газы могут неограниченно расширяться. Они не сохраняют ни формы, ни объема.

Многочисленные удары молекул о стенки сосуда создают давление газа.

Жидкости. В жидкостях молекулы расположены почти вплотную друг к другу (рис. 12). Поэтому молекула в жидкости ведет себя иначе, чем в газе. Зажатая, как в клетке, другими молекулами, она совершает «бег на месте» (колеблется около положения равновесия, сталкиваясь с соседними молекулами). Лишь время от времени она совершает «прыжок», прорываясь сквозь «прутья клетки», но тут же попадает в новую «клетку», образованную новыми соседями. Время «оседлой жизни» молекулы воды, т. е. время колебаний около одного определенного положения равновесия, при комнатной температуре равно в среднем 10^{-11} с. Время же одного колебания значительно меньше ($10^{-12} — 10^{-13}$ с). С повышением температуры время «оседлой жизни» молекул уменьшается. Характер молекулярного движения в жидкостях, впервые установленный советским физиком Я. И. Френкелем, позволяет понять основные свойства жидкостей.

Рис. 11

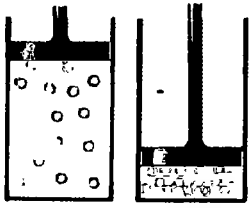


Рис. 12

Рис. 13

Френкель Яков Ильич (1894—1952) — выдающийся советский физик-теоретик, внесший значительный вклад в самые различные области физики. Я. И. Френкель — автор современной теории жидкого состояния вещества. Им заложены основы теории ферромагнетизма. Широко известны работы Я. И. Френкеля по атмосферному электричеству и происхождению магнитного поля Земли. Первая количественная теория деления ядер урана создана Я. И. Френкелем.

Молекулы жидкости находятся непосредственно друг возле друга. Поэтому при попытке изменить объем жидкости даже на малую величину начинается деформация самих молекул (рис. 13). А для этого нужны очень большие силы. Этим и объясняется малая сжимаемость жидкостей

Жидкости, как известно, текучи, т. е. не сохраняют своей формы. Объясняется это следующим. Если жидкость не течет, то перескоки молекул из одного «оседлого» положения в другое происходят с одинаковой частотой по всем направлениям (рис. 12). Внешняя сила заметно не изменяет числа перескоков молекул в секунду, но перескоки молекул из одного «оседлого» положения в другое при этом происходят преимущественно в направлении действия внешней силы (рис. 14). Вот почему жидкость течет и принимает форму сосуда.

Твердые тела. Атомы или молекулы твердых тел в отличие от жидкостей колеблются около определенных положений равновесия. Правда, иногда молекулы изменяют положение равновесия, но происходит это крайне редко. Вот почему твердые тела сохраняют не только объем, но и форму.

Рис. 14

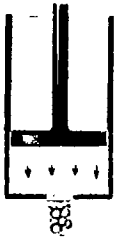


Рис. 15

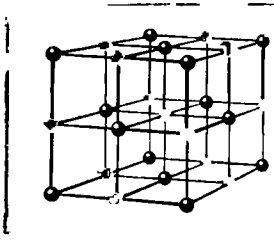
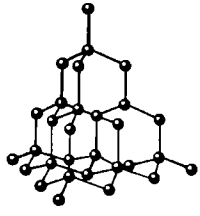


Рис. 16



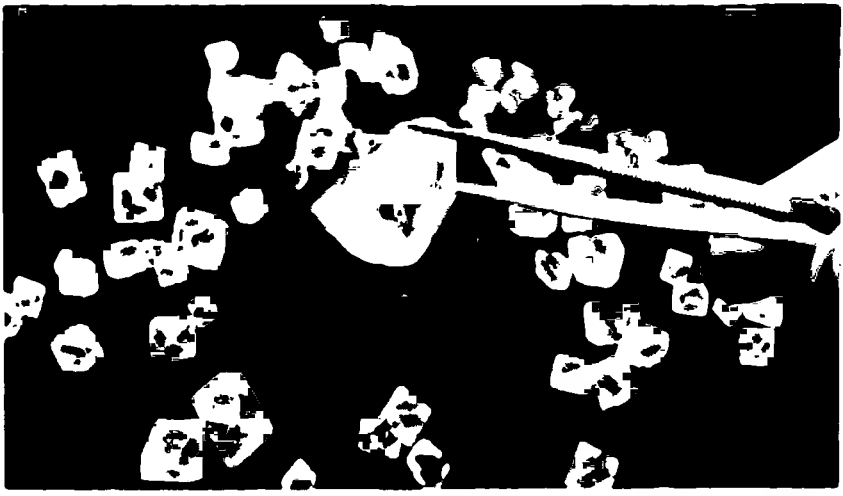


Рис. 17

Есть еще одно важное различие между жидкостями и твердыми телами. Жидкость можно сравнить с толпой, отдельные члены которой беспокойно толкутся на месте, а твердое тело подобно стройной когорте, члены которой хотя и не стоят по стойке «смирно» (вследствие теплового движения), но выдерживают между собой в среднем определенные интервалы. Если соединить центры положений равновесия атомов или ионов твердого тела, то получится правильная пространственная решетка, называемая кристаллической. На рисунках 15 и 16 изображены кристаллические решетки поваренной соли и алмаза. Внутренний порядок в расположении атомов кристаллов приводит к геометрически правильным внешним формам. На рисунке 17 показаны якутские алмазы.

* * *

Качественное объяснение основных свойств вещества на основе молекулярно-кинетической теории, как вы видели, не является особенно сложным. Однако теория, устанавливающая количественные соотношения между измеряемыми на опыте величинами (давлением, температурой и др.) и свойствами самих молекул, их числом и скоростью движения, весьма сложна. Мы ограничимся рассмотрением теории газов.

1. Приведите доказательства существования теплового движения молекул. 2. Почему броуновское движение заметно лишь у частиц малой массы? 3. Какова природа молекулярных сил? 4. Как силы взаимодействия между молекулами зависят от расстояния между ними? 5. Почему два свинцовых бруска с гладкими чистыми срезами слипаются, если их прижать друг к другу? 6. В чем состоит различие теплового движения молекул газов, жидкостей и твердых тел?

6. ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ В МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

Идеальный газ. Идеальный газ с точки зрения молекулярно-кинетической теории — простейшая физическая модель реального газа.

Под моделью в физике понимают не увеличенную или уменьшенную копию реального объекта. Физическая модель — это создаваемая учеными общая картина реальной системы или явления, которая отражает наиболее существенные, наиболее характерные свойства системы.

В физической модели газа принимаются во внимание лишь те основные свойства молекул, учет которых необходим для объяснения главных закономерностей поведения реального газа в определенных интервалах давления и температуры.

В молекулярно-кинетической теории идеальным газом называют газ, состоящий из молекул, взаимодействие между которыми пренебрежимо мало. Иными словами, предполагается, что средняя кинетическая энергия молекул идеального газа во много раз больше потенциальной энергии их взаимодействия.

Реальные газы ведут себя подобно идеальному газу при достаточно больших разрежениях, т. е. *когда среднее расстояние между молекулами во много раз больше их размеров*. В этом случае силами притяжения между молекулами можно полностью пренебречь. Силы же отталкивания проявляются лишь на ничтожно малых интервалах времени при столкновениях молекул друг с другом.

В простейшей модели газа молекулы рассматривают как очень маленькие твердые шарики, обладающие массой. Движение отдельных молекул подчиняется законам механики Ньютона. Конечно, нет никакой гарантии, что с помощью такой модели можно объяснить все процессы в разреженных газах. Ведь известно, что молекулы отличаются не только массами. Они имеют сложное строение.

Но сейчас мы поставим и будем решать достаточно узкую задачу: вычислим давление газа с помощью молекулярно-кинетической теории. Для этой задачи простейшая модель газа оказывается удовлетворительной. Она приводит к результатам, которые подтверждаются опытом.

Давление газа в молекулярно-кинетической теории. Пусть газ находится в закрытом сосуде. Манометр показывает давление газа p_0[1]. Но как возникает это давление? Каждая молекула

---

[1] Напомним: давление определяется отношением модуля F силы, действующей перпендикулярно поверхности, к площади поверхности S: $p=\frac{F}{S}$. Давление выражается в паскалях или миллиметрах ртутного столба: $1\ \text{Па}=1\ \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}=7{,}5\cdot10^{-3}$ мм рт. ст.

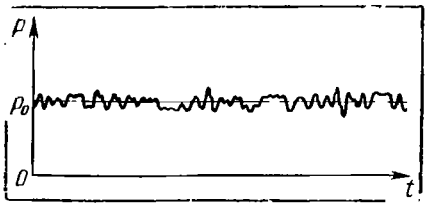


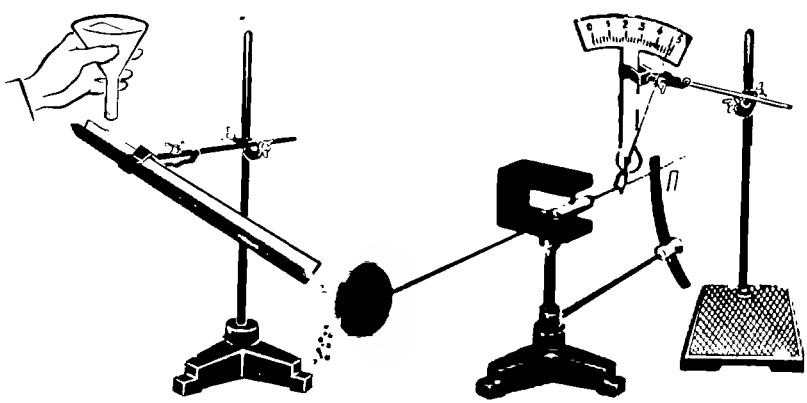
Рис. 18

газа, ударяясь о стенку, в течение малого промежутка времени действует на нее с определенной силой. В результате беспорядочных ударов о стенку сила, действующая со стороны всех молекул на единицу площади стенки, т. е. давление, будет быстро меняться со временем примерно так, как показано на рисунке 18. Однако действия, вызванные ударами отдельных молекул, настолько слабы, что манометром они не регистрируются. Манометр фиксирует среднюю по времени силу, действующую на каждую единицу площади его чувствительного элемента — мембраны. Несмотря на небольшие изменения давления, среднее значение давления p_0 практически оказывается вполне определенной величиной, так как ударов о стенку очень много, а массы молекул очень малы.

Давление газа будет тем больше, чем больше молекул ударяется о стенку за некоторый интервал времени и чем больше скорости соударяющихся со стенкой молекул.

Возникновение давления газа можно пояснить с помощью простой механической модели. Возьмем диск (он играет роль мембраны манометра) и закрепим его на стержне так, чтобы он располагался вертикально и мог поворачиваться вместе со стержнем вокруг вертикальной оси (рис. 19). С помощью наклонного желоба на диск направим струйку мелкой дроби (дробинки играют роль молекул). В результате многочисленных ударов дробинок на диск будет действовать некоторая средняя сила, вызывающая поворот стержня и изгиб упругой пластины *П*. Эффект же от ударов отдельных дробинок не заметен.

Рис. 19



Тепловое движение молекул. С самого начала нужно отказаться от попыток проследить за движением всех молекул, из которых состоит газ. Их слишком много, и из-за столкновений друг с другом они движутся очень сложно. Нам и не нужно знать, как движется каждая молекула. Мы должны выяснить, к какому результату приводит совокупное движение всех молекул.

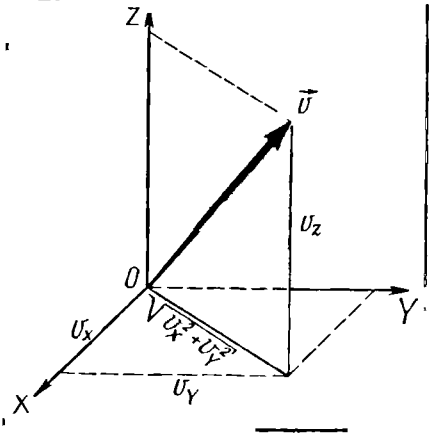


Рис. 20

Характер же движения всей совокупности молекул газа известен из опыта (см. § 3). *Молекулы участвуют в хаотическом (тепловом) движении.* Это означает, что скорость любой молекулы может оказаться как очень большой, так и очень малой, а направление движения молекул беспрестанно меняется при их столкновениях друг с другом.

Скорости отдельных молекул могут быть любыми, однако среднее значение модуля их скорости вполне определенное. Точно так же рост учеников в классе не одинаков. Но среднее значение роста — определенная величина. Чтобы ее найти, надо сложить вместе рост учеников и разделить эту сумму на количество учеников.

Среднее значение квадрата модуля скорости. В дальнейшем нам понадобится среднее значение не самой скорости, а квадрата скорости, от которого зависит средняя кинетическая энергия молекул.

Обозначим модули скоростей отдельных молекул через v_1, v_2, v_3, ..., v_N. Среднее значение квадрата скорости определится следующей формулой:

$$\overline{v^2} = \frac{v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 + \ldots + v_N^2}{N}, \qquad (1.8)$$

где N — число молекул в газе.

Но квадрат модуля вектора скорости равен сумме квадратов проекций скорости на оси координат Ox, Oy, Oz[1]:

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2. \qquad (1.9)$$

Средние значения $\overline{v_x^2}$, $\overline{v_y^2}$ и $\overline{v_z^2}$ можно определить с помощью формул, аналогичных формуле (1.8). Между средним значением

[1] Такое соотношение справедливо для любого вектора. Доказать его вы можете самостоятельно с помощью рисунка 20 и теоремы Пифагора.

$\overline{v^2}$ и средними значениями квадратов проекций существует такое же соотношение, как (1.9):

$$\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}. \tag{1.10}$$

Действительно, для каждой молекулы справедливо выражение (1.9). Сложив эти выражения для отдельных молекул и разделив обе части полученного уравнения на число молекул N, мы придем к формуле (1.10).

Так как направления Ox, Oy и Oz вследствие хаотичности движения молекул равноправны, средние значения квадратов проекций скорости равны друг другу:

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} \tag{1.11}$$

Учитывая соотношение (1.11), подставим в формулу (1.10) $\overline{v_x^2}$ вместо $\overline{v_y^2}$ и $\overline{v_z^2}$. Тогда средний квадрат проекции скорости

$$\overline{v_x^2} = \frac{1}{3}\overline{v^2}, \tag{1.12}$$

т. е. средний квадрат проекции скорости равен 1/3 среднего квадрата самой скорости. Множитель 1/3 появляется вследствие трехмерности пространства и, соответственно, существования трех проекций у любого вектора.

7. ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ГАЗОВ

Вычислим с помощью молекулярно-кинетической теории давление газа. Вывод формулы для давления не очень сложный, но довольно громоздкий. Разобьем его на отдельные этапы.

Пусть газ находится в прямоугольном сосуде $ABCD$, одна из стенок которого представляет собой поршень CD, способный перемещаться без трения (рис. 21). Причем газ и сосуд имеют одинаковые температуры.

Вычислим давление газа на поршень CD, имеющий площадь S. Поверхность поршня расположена перпендикулярно оси Ox. Давление газа возникает в результате столкновений

Рис. 21

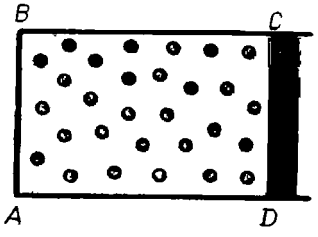
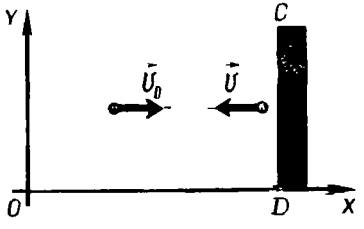


Рис. 22



молекул с поршнем. Чтобы поршень не был вытолкнут из сосуда, к нему извне нужно приложить некоторую силу $\vec{F}$.

Столкновение молекулы с поршнем. Рассмотрим вначале случай, когда скорость $\vec{v}_0$ молекулы до соударения с поршнем (рис. 22) перпендикулярна поверхности поршня. Молекулы в нашей модели — это твердые шарики. При столкновениях со стенкой они отскакивают от нее без изменения кинетической энергии. Подобные соударения называют абсолютно упругими. При этом модуль скорости не меняется, а направление движения меняется на противоположное: $\vec{v} = -\vec{v}_0$. Изменение импульса молекулы равно:

$$m_0\vec{v} - m_0\vec{v}_0 = m_0\vec{v} - (-m_0\vec{v}) = 2m_0\vec{v}.$$

Если же скорость молекулы направлена под произвольным углом к поршню (рис. 23), то при столкновении молекулы с поршнем проекция v_{0x} ее скорости на направление, перпендикулярное поверхности поршня, меняет знак $v_x = -v_{0x}$, а проекции v_{0y} и v_{0z} скоростей на направления, параллельные поверхности поршня, остаются без изменения: $v_y = v_{0y}$; $v_z = v_{0z}$. То же самое происходит с мячом при столкновении с гладкой стенкой, если считать это столкновение абсолютно упругим.

Изменение проекции импульса молекулы на ось Ox равно:

$$m_0v_x - m_0v_{0x} = m_0v_x - (-m_0v_x) = 2m_0v_x. \qquad (1.13)$$

Согласно закону сохранения импульса суммарный импульс молекулы и поршня остается неизменным. Это означает, что модуль изменения импульса поршня равен модулю изменения импульса молекулы. Иначе говоря, при столкновении молекулы с поршнем поршню передается импульс, модуль которого равен $2m_0|v_x|$.

Согласно второму закону Ньютона изменение импульса тела равно импульсу силы — произведению силы на время ее действия. Поэтому модуль импульса силы, действующей на поршень со стороны молекулы за время удара, равен $2m_0|v_x|$.

Число соударений молекул с поршнем. Для того чтобы вычислить импульс силы, действующей на поршень со стороны всех молекул, необходимо подсчитать число соударений моле-

Рис. 23

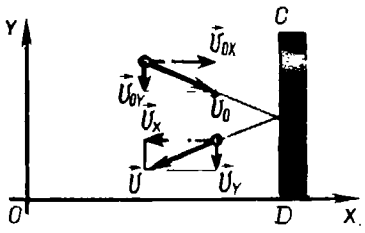
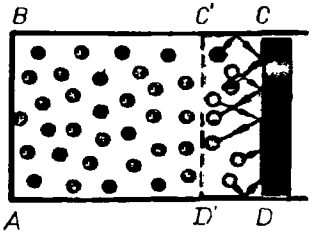


Рис. 24



кул с поршнем за некоторый интервал времени Δt, много больший времени столкновения с поршнем одной молекулы[1].

За время Δt поршня могут достичь только молекулы, которые находятся от него на расстоянии, не превышающем $CC' = |v_x|\Delta t$ (рис. 24). Молекулы, находящиеся на больших расстояниях, не успеют долететь до поршня. Надо еще учесть, что стенки CD достигают за это время лишь те молекулы, у которых $v_x > 0$, т. е. движущиеся слева направо.

Значения проекций скоростей v_y и v_z не влияют на достижение молекулами поршня CD. Если молекула упруго столкнется со стенкой BC или AD (рис. 24), то проекция скорости v_x при этом не изменится и молекула сместится вдоль оси Ox все равно на отрезок $|v_x|\Delta t$.

Выделенный объем $CC'D'D$ равен $|v_x|\Delta t \cdot S$. Если концентрация молекул составляет n, то число их в выделенном объеме равно $n|v_x|\Delta t \cdot S$.

Вследствие хаотичности движения в среднем лишь половина молекул в выделенном объеме имеет проекцию скорости $v_x > 0$ и движется слева направо. У другой половины молекул $v_x < 0$, и они движутся в противоположном направлении.

Следовательно, число ударов z молекул о поршень за время Δt, равное половине всех молекул в выделенном объеме, составляет:

$$z = \frac{n}{2}|v_x|\Delta t \cdot S. \qquad (1.14)$$

Импульс средней силы, действующей на поршень со стороны всех молекул. Каждая молекула при соударении меняет импульс поршня на $2m_0|v_x|$. За время Δt все z молекул изменят его импульс на $2m_0|v_x|z$. Согласно второму закону Ньютона модуль $F\Delta t$ импульса силы, действующей на поршень, равен модулю изменения его импульса:

$$F\Delta t = z2m_0|v_x| = nm_0Sv_x^2\Delta t. \qquad (1.15)$$

Теперь нужно учесть следующее: рассуждения велись так, как будто бы скорости всех молекул одинаковы. На самом деле скорости молекул различны и каждая из них при ударе о поршень вносит свой особый вклад в давление. Для учета этого нужно взять среднее по всем молекулам значение квадрата проекции скорости $\overline{v}_x^2$ вместо v_x^2.

Выражение для среднего значения модуля импульса силы определится формулой $\overline{F}\Delta t = m_0 n S \overline{v}_x^2 \Delta t$.

---

[1] Интервал Δt можно считать таким, что в слое толщиной $|v_x|\Delta t$ столкновений молекул практически не происходит, хотя число молекул и велико. Это возможно, так как среднее расстояние между молекулами много меньше средней длины свободного пробега молекул, т. е. среднего расстояния, проходимого молекулами без столкновений.

Так как $\overline{v_x^2} = \frac{1}{3}\overline{v^2}$ (см. 1.12), то

$$\overline{F}\Delta t = \frac{1}{3} m_0 n S \overline{v^2} \Delta t. \qquad (1.16)$$

Давление газа. Разделив левую и правую части уравнения (1.16) на произведение $\Delta t \cdot S$, найдем давление газа:

$$\boxed{p = \frac{1}{3} m_0 n \overline{v^2}.} \qquad (1.17)$$

Это и есть основное уравнение молекулярно-кинетической теории.

Давление идеального газа пропорционально произведению массы молекулы, числа молекул в единице объема и среднего квадрата скорости движения молекул.

Формула (1.17) связывает макроскопическую величину — давление, которое может быть измерено манометром,— с микроскопическими величинами, характеризующими молекулы, и является как бы мостом между двумя мирами: макроскопическим и микроскопическим.

Если через $\bar{E}$ обозначить среднюю кинетическую энергию поступательного движения молекулы $\bar{E} = \frac{m_0 \overline{v^2}}{2}$, то уравнение (1.17) можно записать в форме:

$$\boxed{p = \frac{2}{3} n E.} \qquad (1.18)$$

В следующей главе будет доказано, что средняя кинетическая энергия молекул определяется температурой газа.

? **1. Что называют идеальным газом в молекулярно-кинетической теории? 2. Каков механизм возникновения давления газа с точки зрения молекулярно-кинетической теории? 3. Чему равно среднее значение проекции скорости молекулы на ось Ox? 4. Дайте определение среднего значения квадрата скорости молекул. 5. Чему равно изменение импульса молекулы при ее соударении со стенкой? 6. От чего зависит число соударений молекул с поршнем площади S за время Δt? 7. Запишите основное уравнение молекулярно-кинетической теории.**

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

При решении большей части задач первой главы нужно уметь определять молярные массы веществ. Для этого по известным из таблицы Менделеева относительным атомным массам надо определить относительную молекулярную массу, а затем и мо-

лярную массу по формуле $M=10^{-3}M_r$ кг/моль, где M — молярная масса; M_r — относительная молекулярная масса.

Во многих задачах требуется по известной массе тела определить количество вещества или число молекул (атомов) в нем. Для этого используются формулы: $\nu=\frac{m}{M}$ и $N=\frac{m}{M}N_A$. Массы отдельных молекул определяются по формуле: $m_0=\frac{M}{N_A}$. В некоторых задачах массу вещества нужно выразить через его плотность ρ и объем V.

При решении задач удобно иметь перед глазами указанные выше и все остальные формулы § 2.

В ряде задач используется основное уравнение молекулярно-кинетической теории в форме (1.17) или (1.18).

1. Определить молярную массу воды.

Решение. Относительная атомная масса водорода равна 1,00797, а кислорода 15,9994. Химическая формула воды H_2O. Следовательно, относительная молекулярная масса воды равна:

$$M_r=2\cdot 1{,}00797+15{,}9994=18{,}01534\approx 18.$$

Молярная масса воды $M\approx 10^{-3}\cdot 18$ кг/моль$\approx 0{,}018$ кг/моль.

2. Определить количество вещества и число молекул, содержащихся в 1 кг углекислого газа.

Решение. Так как молярная масса углекислого газа $M=0{,}044$ кг/моль, то количество вещества $\nu=\frac{m}{M}=\frac{1}{0{,}044}$ моль$\approx 22{,}7$ моль. Число молекул $N=\frac{m}{M}N_A=\nu N_A=22{,}7\cdot 6{,}02\cdot 10^{23}\approx 1{,}4\cdot 10^{25}$.

3. Молекулы газа, концентрация которых $n=2{,}7\cdot 10^{25}$ м$^{-3}$, производят на стенки сосуда давление $p=10^5$ Па. Какова средняя кинетическая энергия $\bar{E}$ поступательного движения молекул?

Решение. Согласно основному уравнению молекулярно-кинетической теории газов, записанному в форме (1.18), давление $p=\frac{2}{3}n\bar{E}$.

Отсюда

$$\bar{E}=\frac{3p}{2n}=\frac{3\cdot 10^5\ \text{Н/м}^2}{2\cdot 2{,}7\cdot 10^{25}\ \text{м}^{-3}}=5{,}6\cdot 10^{-21}\ \text{Дж}.$$

4. Плотность газа в баллоне газополной электрической лампы $\rho=0{,}9$ кг/м^3. При горении лампы давление в ней возросло с $p_1=8\cdot 10^4$ Па до $p_2=1{,}1\cdot 10^5$ Па. На сколько увеличилась при этом средняя скорость молекул газа?

Решение. Произведение массы m_0 одной молекулы на концентрацию молекул (число молекул в единице объема) n равно массе молекул, заключенных в единице объема, т. е. плотности газа $\varrho = m_0 n$. Следовательно, основное уравнение молекулярно-кинетической теории (1.17) можно записать в виде: $p = \frac{1}{3}\varrho\overline{v^2}$.

Поэтому

$$\overline{v}_1 = \sqrt{\frac{3p_1}{\varrho}}, \quad \overline{v}_2 = \sqrt{\frac{3p_2}{\varrho}}.$$

Отсюда

$$\overline{v}_2 - \overline{v}_1 = \sqrt{\frac{3}{\varrho}}(\sqrt{p_2} - \sqrt{p_1}); \quad \overline{v}_2 - \overline{v}_1 = 90 \text{ м/с}.$$

Упр. 1

1. Какую площадь может занять капля оливкового масла объемом 0,02 см^3 при расплывании ее на поверхности воды?

2. Считая диаметр атома вольфрама $d \approx 2 \cdot 10^{-10}$ м, оценить количество атомов, покрывающих поверхность острия иглы. Острие считать полушаром радиуса $5 \cdot 10^{-8}$ м.

3. Определить молярные массы водорода и гелия.

4. Во сколько раз число атомов в 12 кг углерода превышает число молекул в 16 кг кислорода?

5. Каково количество вещества (в молях), содержащегося в 1 г воды?

6. Чему равно число молекул в 10 г кислорода?

7. Молярная масса азота равна 0,028 кг/моль. Чему равна масса молекулы азота?

8. Определить число атомов в 1 м^3 меди. Молярная масса меди $M = 0{,}0635$ кг/моль; ее плотность $\varrho = 9000$ кг/м^3.

9. Плотность алмаза 3500 кг/м^3. Какой объем займут 10^{22} атомов этого вещества?

10. Как изменится давление газа, если концентрация его молекул увеличится в 3 раза, а средняя скорость молекул уменьшится в 3 раза?

11. Под каким давлением находится газ в сосуде, если средний квадрат скорости его молекул $\overline{v^2} = 10^6$ м^2/с^2, концентрация молекул $n = 3 \cdot 10^{25}$ м$^{-3}$, масса каждой молекулы $m_0 = 5 \cdot 10^{-26}$ кг?

12. В колбе объемом 1,2 л содержится $3 \cdot 10^{22}$ молекул гелия. Какова средняя кинетическая энергия каждой молекулы? Давление газа в колбе 10^5 Па.

13. Вычислить средний квадрат скорости движения молекул газа, если его масса $m = 6$ кг, объем $V = 4{,}9$ м^3 и давление $p = 200$ кПа.

КРАТКИЕ ИТОГИ ГЛАВЫ I

Согласно основным положениям молекулярно-кинетической теории все тела состоят из молекул (или атомов); между молекулами на малых расстояниях, меньших собственных размеров молекул, действуют силы отталкивания, а на больших — силы притяжения; молекулы участвуют в хаотическом тепловом движении.

В настоящее время все основные положения молекулярно-кинетической теории строго доказаны экспериментально. Измерены массы молекул и их размеры; определен характер зависимости сил взаимодействия молекул от расстояния между ними; наблюдение хаотического движения мелких, но видимых в микроскоп твердых частиц в жидкостях и газах (броуновское движение) с несомненностью доказывает наличие теплового движения молекул.

Массы молекул малы, а число их в больших (макроскопических) телах огромно. Поэтому массы молекул и их количество в макроскопических телах выражают в относительных единицах.

Относительной молекулярной (или атомной) массой называют отношение массы молекулы (или атома) к 1/12 массы атома углерода (1.2).

Количеством вещества называют отношение числа молекул в данном теле к числу атомов в 0,012 кг углерода (1.3).

Количество вещества измеряют в молях. Моль — количество вещества, содержащее столько же молекул, сколько содержится атомов в 0,012 кг углерода.

Число молекул или атомов в моле вещества называют постоянной Авогадро $N_A = 6{,}02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}$.

Молярной массой называют массу вещества, взятого в количестве одного моля (1.5).

В газах расстояние между молекулами много больше их размеров. В жидкостях и твердых телах молекулы (или атомы) находятся непосредственно друг возле друга. В твердых телах атомы (или молекулы) расположены в строгом порядке и совершают колебания около неизменных положений равновесия. В жидкостях молекулы расположены неупорядоченно и время от времени совершают перескоки из одного положения равновесия в другое.

В молекулярно-кинетической теории идеальным называют газ, состоящий из молекул, взаимодействие между которыми пренебрежимо мало. Средняя кинетическая энергия молекул идеального газа во много раз больше средней потенциальной энергии их взаимодействия.

Согласно основному уравнению молекулярно-кинетической теории давление газа пропорционально произведению концентрации молекул на среднюю кинетическую энергию поступательного движения молекул:

$$p = \frac{2}{3} nE, \qquad \text{где} \qquad \bar{E} = \frac{m_0 \overline{v^2}}{2}.$$

Глава II.

ТЕМПЕРАТУРА. ЭНЕРГИЯ ТЕПЛОВОГО ДВИЖЕНИЯ МОЛЕКУЛ

8. ТЕПЛОВОЕ РАВНОВЕСИЕ. ТЕМПЕРАТУРА

Макроскопические параметры. Для описания процессов в газах и других макроскопических телах нет необходимости все время обращаться к молекулярно-кинетической теории. Поведение макроскопических тел, в частности газов, можно охарактеризовать немногим числом физических величин, относящихся не к отдельным молекулам, слагающим тела, а ко всем молекулам в целом. К числу таких величин относятся объем V, давление p, температура t и др.

Так, газ данной массы всегда занимает некоторый объем, имеет определенные давление и температуру. Объем и давление представляют собой механические величины, описывающие состояние газа. Температура в механике не рассматривается, так как она характеризует внутреннее состояние тела.

Любое макроскопическое тело или группа макроскопических тел называется термодинамической системой. Величины, характеризующие состояние термодинамической системы без учета молекулярного строения тел, называют макроскопическими (или термодинамическими) параметрами. Макроскопические параметры не исчерпываются объемом, давлением и температурой. Например, для смеси газов нужно еще знать концентрации отдельных компонентов смеси. Обычный атмосферный воздух представляет собой такую смесь.

Холодные и горячие тела. Центральное место во всем учении о тепловых явлениях занимает понятие температуры. Все мы отлично знаем различие между холодными и горячими телами. На ощупь мы можем определить, какое тело нагрето сильнее, и говорим, что это тело имеет более высокую температуру. Температура характеризует степень нагретости тела. Для измерения температуры был создан прибор, называемый термометром. В его устройстве использовано свойство тел изменять объем при нагревании или охлаждении.

Тепловое равновесие. Для измерения температуры тела человека нужно подержать медицинский термометр под мышкой 5—8 мин. За это время ртуть в термометре нагревается и уровень ее повышается. По длине столбика ртути можно определить температуру. То же самое происходит при измерении температуры любого тела любым термометром. Термометр никогда не покажет температуру тела сразу же после того, как он приведен в соприкосновение с телом. Необходимо некоторое время для того, чтобы температуры тела и термометра выравнялись и между ними

установилось тепловое равновесие, при котором температура перестает изменяться.

Тепловое равновесие с течением времени устанавливается между любыми телами с различной температурой. Бросьте в стакан с водой кусочек льда и закройте стакан плотной крышкой. Лед начнет плавиться, а вода охлаждаться. Когда лед растает, вода станет нагреваться, и после того, как она примет температуру окружающего воздуха, никаких изменений внутри стакана с водой происходить не будет.

Из этих и подобных им простых наблюдений можно сделать вывод о существовании очень важного общего свойства тепловых явлений. Любое макроскопическое тело или группа макроскопических тел — термодинамическая система — *при неизменных внешних условиях самопроизвольно переходит в состояние теплового равновесия.* **Тепловым или термодинамическим равновесием называют такое состояние, при котором все макроскопические параметры сколь угодно долго остаются неизменными.** Это означает, что в системе не меняются объем и давление, не происходит теплообмена, отсутствуют взаимные превращения газов, жидкостей и твердых тел и т. д. В частности, не меняется объем столбика ртути в термометре. Это означает, что температура системы остается постоянной.

Но микроскопические процессы внутри тела не прекращаются и при тепловом равновесии. Меняются положения молекул, их скорости при столкновениях.

Температура. Термодинамическая система может находиться в различных состояниях теплового равновесия. В каждом из этих состояний температура имеет свое, строго определенное значение. Другие величины в состоянии теплового равновесия могут иметь различные (но постоянные) значения. Так, объемы различных частей системы и давления внутри них при наличии твердых перегородок могут быть разными. Если вы внесете с улицы мяч, наполненный сжатым воздухом, то спустя некоторое время температура воздуха в мяче и комнате выравняется. Давление же воздуха в мяче все равно будет больше комнатного. Только после нарушения герметичности мяча воздух из него начнет выходить и давления выравняются.

Температура характеризует состояние теплового равновесия макроскопической системы: во всех частях системы, находящейся в состоянии теплового равновесия, температура имеет одно и то же значение.

При одинаковых температурах двух тел между ними не происходит теплообмена. Тела находятся в состоянии теплового равновесия. Если же температуры тел различны, то при установлении между ними теплового контакта будет происходить обмен энергией. При этом тело с большей температурой будет отдавать энергию телу с меньшей температурой. *Разность температур тел указывает направление теплообмена между ними.*

? 1. Какие величины характеризуют внутреннее состояние макроскопических тел? 2. Каковы отличительные признаки состояния теплового равновесия? 3. Приведите примеры установления теплового равновесия тел, окружающих вас в повседневной жизни. 4. Какой физической величиной характеризуется состояние теплового равновесия?

9. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Термометры. Для измерения температуры можно воспользоваться изменением любой макроскопической величины в зависимости от температуры: объема, давления, электрического сопротивления и т. д.

Чаще всего на практике используют зависимость объема жидкости (ртути или спирта) от изменения температуры. При градуировке термометра обычно за начало отсчета (0) принимают температуру тающего льда; второй постоянной точкой (100) считают температуру кипения воды при нормальном атмосферном давлении (шкала Цельсия). Шкалу между точками 0 и 100 делят на 100 равных частей, называемых градусами (рис. 25). Перемещение столбика жидкости на одно деление соответствует изменению температуры на 1°С.

Рис. 25

Так как различные жидкости расширяются при нагревании не совсем одинаково, то установленная таким образом шкала будет до некоторой степени зависеть от свойств жидкости. 0 и 100°С будут, конечно, совпадать у всех термометров, но, скажем, 50°С совпадать не будут.

Какое же вещество выбрать, для того чтобы избавиться от этой зависимости? Было замечено, что в отличие от жидкостей все разреженные газы — водород, гелий, кислород — расширяются при нагревании одинаковым образом и одинаково меняют свое давление при изменении температуры. По этой причине в физике для установления рациональной температурной шкалы используют изменение давления определенного количества разреженного газа при постоянном объеме или изменение объема газа при постоянном давлении. Такую шкалу иногда называют идеальной газовой шкалой температур. При ее установлении удается избавиться еще от одного существенного недостатка шкалы Цельсия — произвольности выбора начала отсчета, т. е. нулевой температуры. Ведь за начало отсчета вместо температуры таяния льда с тем же успехом можно было бы взять температуру кипения воды.

Сейчас мы подробно рассмотрим, как можно использовать разреженные газы для определения температуры.

Газы в состоянии теплового равновесия. Возьмем несколько сосудов, заполненных различными газами, например водородом, гелием и кислородом. Сосуды имеют определенные известные объемы и снабжены манометрами. Это позволяет измерять давление в каждом из сосудов.

Количество газа ν в любом сосуде тоже известно. Тем самым известно и число молекул N в каждом сосуде. Согласно формулам (1.3), (1.7)

$$N=\nu N_A=\frac{m}{M}N_A,$$

где N_A — постоянная Авогадро, m — масса газа, а M — его молярная масса.

Приведем газы в состояние теплового равновесия. Для этого поместим сосуды в тающий лед и подождем, пока не установится равновесие и давление газов перестанет меняться (рис. 26). После этого можно утверждать, что все газы имеют одинаковую температуру 0°С. Но, разумеется, давления газов p, их объемы V и числа молекул N будут различными.

Можно, однако, ожидать, что между p, V, N одного газа и теми же величинами любого другого газа должна существовать связь, если только температуры газов одинаковы. На это указывает основное уравнение молекулярно-кинетической теории (1.18). В самом деле, так как концентрация газа $n=\frac{N}{V}$, то из (1.18) следует:

$$\frac{pV}{N}=\frac{2}{3}\bar{E}, \qquad (2.1)$$

где $\bar{E}$ — средняя кинетическая энергия молекул.

Из курса физики VI класса известно, что, чем быстрее движутся молекулы, тем выше их температура. Естественно предположить, что при тепловом равновесии средние кинетические энергии молекул всех газов одинаковы. А это означает согласно (2.1), что $\frac{pV}{N}$ одинаково для всех газов в состоянии теплового равновесия.

Конечно, это пока лишь предположение, нуждающееся в экспериментальной проверке. Такую проверку можно произвести, зная V и N всех газов и измеряя их давления при определенной температуре, например при температуре тающего льда.

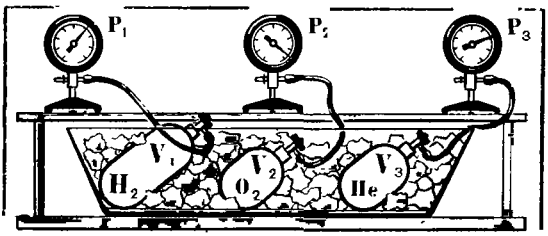


Рис. 26

Так, если 1 моль водорода занимает объем $V_{H_2}=0{,}1$ м^3, то при температуре 0°С его давление оказывается равным $p_{H_2}=22{,}65\cdot10^3$ Па. Отсюда

$$\frac{p_{H_2}V_{H_2}}{N_{H_2}}=\frac{22{,}65\cdot10^3\cdot0{,}1}{6{,}02\cdot10^{23}}\ \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}\ \text{м}^3=3{,}76\cdot10^{-21}\ \text{Дж}. \qquad (2.2)$$

Такое же значение отношения произведения давления газа на его объем к числу молекул получается и для всех других газов при температуре тающего льда. Обозначим это отношение через Θ_0. Тогда

$$\frac{p_{H_2}V_{H_2}}{N_{H_2}}=\frac{p_{He}V_{He}}{N_{He}}=\frac{p_{O_2}V_{O_2}}{N_{O_2}}=\Theta_0. \qquad (2.3)$$

Таким образом, наше предположение оказалось верным.

Правда, соотношение (2.3) не является абсолютно точным. При давлениях в тысячи атмосфер, когда газы становятся весьма плотными, отношение $\frac{pV}{N}$ перестает быть строго определенным, не зависящим от занимаемых газами объемов. Оно выполняется для достаточно разреженных газов, когда их можно считать идеальными.

Если все сосуды с газами поместить в кипящую при нормальном атмосферном давлении воду (100°С), то $\frac{pV}{N}=\Theta_{100}$ по-прежнему будет одним и тем же для всех газов, но увеличится. Теперь, как показывает опыт,

$$\frac{pV}{N}=\Theta_{100}=5{,}14\cdot10^{-21}\text{Дж}. \qquad (2.4)$$

Можно благодаря этому утверждать, что величина Θ зависит от температуры. Более того, Θ ни от чего, кроме температуры, зависеть не может. Ведь Θ не зависит ни от сорта газа, ни от его объема и давления, ни от числа частиц в сосуде, ни от формы самого сосуда.

Определение температуры. Этот опытный факт позволяет рассматривать величину Θ как естественную меру температуры.

В принципе можно было бы считать температурой саму величину Θ и измерять температуру в энергетических единицах — джоулях. Однако, во-первых, это неудобные для практического использования единицы. 100°С соответствовала бы очень малая величина — порядка 10^{-21} Дж. А во-вторых, и это, главное, уже давно принято измерять температуру в градусах.

Будем считать величину Θ прямо пропорциональной температуре T, измеряемой в градусах:

$$\Theta=kT, \qquad (2.5)$$

где k — коэффициент пропорциональности. Тогда

$$\frac{pV}{N}=kT. \tag{2.6}$$

На основании этой формулы устанавливается температурная шкала, не зависящая от выбора вещества, используемого для измерения температуры.

10. АБСОЛЮТНАЯ ТЕМПЕРАТУРА. ТЕМПЕРАТУРА — МЕРА СРЕДНЕЙ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ МОЛЕКУЛ

Абсолютный нуль температуры. Температура, определяемая формулой (2.6), очевидно, не может быть отрицательной, так как все величины, стоящие в левой части (2,6), заведомо положительны. Следовательно, наименьшее возможное значение температуры T есть $T=0$, когда либо давление p, либо объем V равны нулю. Предельную температуру, при которой давление идеального газа обращается в нуль при фиксированном объеме или объем идеального газа стремится к нулю при неизменном давлении, называют абсолютным нулем температуры. Это самая низкая температура в природе, та «наибольшая или последняя степень холода», существование которой предсказывал Ломоносов.

Абсолютная шкала температур. Английский ученый У. Кельвин ввел абсолютную шкалу температур. Нулевая температура по абсолютной шкале (ее называют также шкалой Кельвина) соответствует абсолютному нулю а каждая единица температуры по этой шкале равна градусу по шкале Цельсия.

Единица абсолютной температуры в СИ называется кельвином (обозначается буквой К).

Постоянная Больцмана. Определим коэффициент k в формуле (2.6) так, чтобы один кельвин равнялся градусу по шкале Цельсия.

Мы знаем значения Θ при 0°С и 100°С (формулы 2.2 и 2.4). Обозначим абсолютную температуру при 0°С через T_1, а при 100°С через T_2. Тогда

$$\Theta_{100}-\Theta_0=k(T_2-T_1)\,\text{К, или}$$

$$\Theta_{100}-\Theta_0=k100\ \text{К}=(5{,}14-3{,}76)\cdot 10^{-21}\ \text{Дж}.$$

Отсюда $k=\dfrac{5{,}14-3{,}76}{100}\cdot 10^{-21}\dfrac{\text{Дж}}{\text{К}}=1{,}38\cdot 10^{-23}\dfrac{\text{Дж}}{\text{К}}$.

Коэффициент

$$k=1{,}38\cdot 10^{-23}\frac{\text{Дж}}{\text{К}}. \tag{2.7}$$

Больцман Людвиг (1844—1906) — великий австрийский физик, один из основоположников молекулярно-кинетической теории. В трудах Больцмана молекулярно-кинетическая теория впервые предстала как логически стройная, последовательная физическая теория. Больцман много сделал для развития и популяризации теории электромагнитного поля Максвелла. Борец по натуре, он страстно отстаивал необходимость молекулярного истолкования тепловых явлений и принял на себя основную тяжесть борьбы с учеными, отрицавшими существование молекул.

называется постоянной Больцмана в честь великого австрийского физика Л. Больцмана, одного из основателей молекулярно-кинетической теории газов.

Постоянная Больцмана связывает температуру Θ в энергетических единицах с температурой T в кельвинах. Это одна из наиболее важных постоянных молекулярно-кинетической теории.

Связь абсолютной шкалы и шкалы Цельсия. Зная постоянную Больцмана, можно найти значение абсолютного нуля по шкале Цельсия. Для этого найдем сначала значение абсолютной температуры, соответствующее 0°С.

Так как при 0°С $kT_1 = 3{,}76 \cdot 10^{-21}$ Дж, то $T_1 = \frac{3{,}76 \cdot 10^{-21}}{1{,}38 \cdot 10^{-23}}$ К $\approx$ ≈ 273 К.

Один кельвин и один градус шкалы Цельсия совпадают. Поэтому любое значение абсолютной температуры T будет на 273 градуса выше соответствующей температуры t по Цельсию:

$$T = t + 273. \qquad (2.8)$$

Но изменение абсолютной температуры ΔT равно изменению температуры по шкале Цельсия Δt: $\Delta T = \Delta t$.

На рисунке 27 для сравнения изображены абсолютная шкала и шкала Цельсия. Абсолютному нулю соответствует температура $t = -273$°С[1].

Температура — мера средней кинетической энергии молекул. Из основного уравнения молекулярно-кинетической теории в форме (2.1) и определения температуры (2.6) вытекает важнейшее следствие: абсолютная температура есть мера средней кинетической энергии движения молекул. Докажем это.

[1] Более точное значение абсолютного нуля: — 273,15°С.

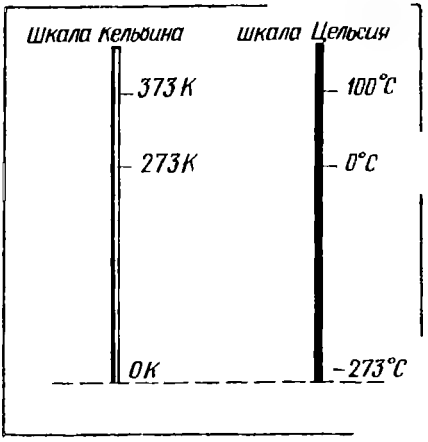


Рис. 27

Левые части уравнений $\frac{pV}{N}=\frac{2}{3}\bar{E}$ и $\frac{pV}{N}=kT$ одинаковы. Значит, должны быть равны и их правые части. Отсюда вытекает связь между средней кинетической энергией поступательного движения молекул и температурой:

$$\bar{E}=\frac{3}{2}kT. \qquad (2.9)$$

Средняя кинетическая энергия хаотического движения молекул газа пропорциональна абсолютной температуре. Чем выше температура, тем быстрее движутся молекулы. Таким образом, выдвинутая ранее догадка о связи температуры со средней скоростью молекул получила надежное обоснование.

Соотношение между температурой и средней кинетической энергией поступательного движения молекул (2.9) установлено для разреженных газов. Однако оно оказывается справедливым для любых веществ, движение атомов или молекул которых подчиняется законам механики Ньютона. Оно верно для жидкостей и твердых тел, у которых атомы могут лишь колебаться возле положений равновесия в узлах кристаллической решетки.

При приближении температуры к абсолютному нулю энергия теплового движения молекул также приближается к нулю.

Зависимость давления газа от его концентрации и температуры. Подставляя (2.9) в формулу (1.18), получим выражение, показывающее зависимость давления газа от концентрации молекул и температуры:

$$p=nkT. \qquad (2.10)$$

Из формулы (2.10)[1] вытекает, что при одинаковых давлениях и температурах концентрация молекул у всех газов одна и та же.

Отсюда следует закон Авогадро, известный вам из курса химии VIII класса: **в равных объемах газов при одинаковых температурах и давлениях содержится одинаковое число молекул.**

[1] Эту формулу можно также получить из уравнения (2.6).

? **1. Какие свойства макроскопических тел используются для измерения температуры? 2. В чем преимущество использования разреженных газов для измерения температуры? 3. Как связаны объем, давление и число молекул различных газов в состоянии теплового равновесия? 4. Каков физический смысл постоянной Больцмана? 5. Какие преимущества имеет абсолютная шкала температур по сравнению с другими шкалами? 6. Чему равен абсолютный нуль температуры по шкале Цельсия? 7. Как зависит от температуры средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул? 8. Как связано давление газа с его температурой и концентрацией молекул? 9. Каков физический смысл абсолютного нуля температуры?**

11. ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТЕЙ МОЛЕКУЛ ГАЗА

Средняя скорость теплового движения молекул. Уравнение (2.9) дает возможность найти среднюю скорость теплового движения молекул. Подставляя в это уравнение $\bar{E}=\frac{m_0\overline{v^2}}{2}$, получим выражение для среднего квадрата скорости:

$$\overline{v^2}=3\frac{kT}{m_0}. \qquad (2.11)$$

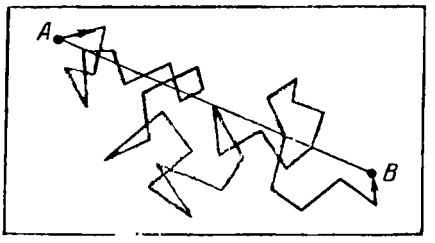
Отсюда средняя скорость молекулы (точнее, средняя квадратическая скорость) равна:

$$\boxed{\overline{v}=\sqrt{\frac{3kT}{m_0}}} \qquad (2.12)$$

Вычисляя по формуле (2.12) скорость молекул, например азота, при $t=0°C$, получим: $v\approx 500$ м/с. Молекулы водорода при той же температуре имеют скорость $v\approx 1800$ м/с.

Когда впервые были получены эти числа (вторая половина XIX в.), многие физики были ошеломлены. Скорости молекул газа по расчетам оказались бо́льшими, чем скорости артиллерийских снарядов! Высказывали на этом основании даже сомнения в справедливости кинетической теории. Ведь известно, что запахи распространяются довольно медленно: нужно время порядка десятков секунд, чтобы запах духов, пролитых в одном углу комнаты, распространился до другого угла. Это нетрудно объяснить. Из-за столкновений молекул траектория каждой молекулы представляет

Рис. 28



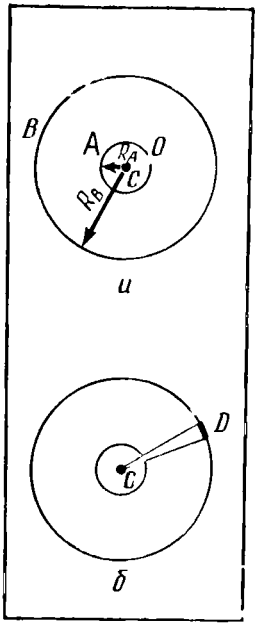


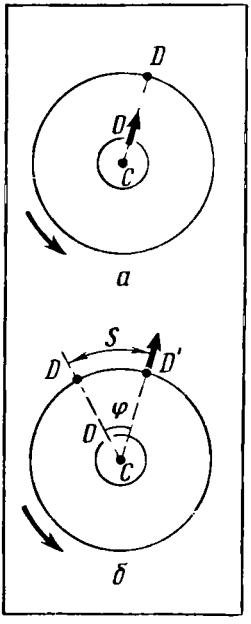
Рис. 29

собой запутанную ломаную линию (рис. 28). Большие скорости молекула имеет на прямолинейных отрезках ломаной. Перемещение же молекулы в каком-либо направлении в среднем невелико даже за время порядка нескольких минут. При перемещении молекулы из точки A в точку B пройденный ею путь оказывается гораздо больше расстояния $|AB|$.

Экспериментальное определение скоростей молекул. Опыты по определению скоростей молекул доказали справедливость формулы (2.12). Один из опытов был предложен Штерном в 1920 г.

Прибор Штерна состоит из двух коаксиальных цилиндров A и B, жестко связанных друг с другом (рис. 29, *а*). Цилиндры могут вращаться с постоянной угловой скоростью. Вдоль оси малого цилиндра натянута тонкая платиновая проволочка C, покрытая слоем серебра. По проволочке пропускают электрический ток. В стенке этого цилиндра имеется узкая щель O. Воздух из цилиндров откачан. Цилиндр B находится при комнатной температуре.

Рис. 30



Вначале прибор неподвижен. При прохождении тока по нити слой серебра испаряется и внутренний цилиндр заполняется газом из атомов серебра. Некоторые атомы пролетают через щель O и, достигнув внутренней поверхности цилиндра B, осаждаются на ней. В результате прямо против щели образуется узкая полоска серебра D (рис. 29, *б*).

Затем цилиндры приводят во вращение с угловой скоростью ω. Теперь за время t, необходимое атому для прохождения пути, равного разности радиусов цилиндров $R_B - R_A$, цилиндры повернутся на некоторый угол φ. В результате атомы, движущиеся с постоянной скоростью, попадут на внутреннюю поверхность большого цилиндра не прямо против щели O (рис. 30, *а*), а на некотором расстоянии s от конца радиуса, проходящего через середину щели (рис. 30, *б*). Ведь атомы движутся прямолинейно. Расстояние s равно:

$$s = \varphi R_B = \omega t R_B. \qquad (2.13)$$

В действительности не все атомы серебра имеют одну и ту же скорость. Поэтому расстояния s для различных атомов будут несколько различаться. Под s следует понимать расстояние между участками на полосках D и D' с наибольшей концентрацией атомов серебра. Этому расстоянию будет соответствовать средняя скорость атомов.

Средняя скорость атома равна:

$$\overline{v} = \frac{R_B - R_A}{t}.$$

Подставляя в эту формулу значение t из выражения (2.13), получим:

$$\overline{v} = \frac{\omega R_B (R_B - R_A)}{s}.$$

Зная ω, R_A и R_B и измеряя среднее смещение s полоски серебра, вызванное вращением прибора, находим среднюю скорость атомов серебра.

Модули скоростей, определенные из опыта, совпадают с теоретическим значением средней квадратической скорости. *Это служит экспериментальным доказательством справедливости формулы* (2.12), *а следовательно* и (2.9), согласно которой средняя кинетическая энергия молекулы прямо пропорциональна абсолютной температуре.

Средняя скорость броуновской частицы. Формула (2.12) позволяет понять, почему интенсивность броуновского движения возрастает с повышением температуры жидкости и уменьшается при увеличении массы частицы. Ведь броуновская частица участвует в тепловом движении молекул. Поэтому ее средняя кинетическая энергия также определяется формулой (2.9), а средняя квадратическая скорость — формулой

$$v = \sqrt{\frac{3kT}{m}},$$

где m — масса броуновской частицы. Если масса частицы велика, то средняя скорость ее движения настолько мала, что движение частицы практически нельзя обнаружить.

? **1. Как изменится средняя квадратическая скорость движения молекул при увеличении температуры в 4 раза? 2. Какие молекулы в атмосфере движутся быстрее: молекулы азота или молекулы кислорода? 3. Почему толщина слоя полоски серебра на поверхности внешнего вращающегося цилиндра в опыте Штерна неодинакова по ширине полоски?**

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

При решении задач этой главы используется формула (2.6), определяющая абсолютную температуру, формула (2.9), связывающая среднюю энергию хаотического движения с температурой, и формула (2.12) для средней квадратической скорости молекул. Некоторые задачи удобно решать, используя формулу (2.10), связывающую давление газа с концентрацией молекул и абсолютной температурой.

Кроме того, нужно знать значение постоянной Больцмана (2.7).

1. Чему равно отношение произведения давления газа на его объем к числу молекул при температуре $t=300°C$?

Решение. Согласно формуле (2.6) $\frac{pV}{N}=kT$, где $k=1{,}38\cdot10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана. Так как абсолютная температура $T=t+273=573$ К, то

$$\frac{pV}{N}=1{,}38\cdot10^{-23}\ \text{Дж/К}\cdot573\ \text{К}=7{,}9\cdot10^{-21}\ \text{Дж}.$$

2. Определить среднюю квадратическую скорость молекулы газа при 0°С. Молярная масса газа $M=0{,}019$ кг/моль.

Решение. Средняя квадратическая скорость молекул вычисляется по формуле (2.12), где следует положить $m_0=\frac{M}{N_A}$ и $T=273$ К:

$$\bar{v}=\sqrt{\frac{3kT}{m_0}}=\sqrt{\frac{3kN_AT}{M}}=$$

$$=\sqrt{\frac{3\cdot1{,}38\cdot10^{-23}\cdot6{,}02\cdot10^{23}\cdot273}{0{,}019}}\ \text{м/с};\ \bar{v}\approx600\ \text{м/с}.$$

3. Некоторое количество водорода находится при температуре $T_1=200$ К и давлении $p_1=400$ Па. Газ нагревают до температуры $T_2=10\,000$ К, при которой молекулы водорода практически полностью распадаются на атомы. Определить новое значение давления газа p_2, если его объем и масса остались без изменения.

Решение. Согласно формуле (2.10) давление газа при температуре T_1 равно: $p_1=n_1kT_1$, где n_1 — концентрация молекул водорода.

При расщеплении молекул водорода на атомы число частиц в сосуде увеличивается в два раза. Следовательно, концентрация атомов водорода равна: $n_2=2n_1$. Давление атомарного водорода $p_2=n_2kT_2=2n_1kT_2$.

Разделив почленно второе уравнение на первое, получим: $\frac{p_2}{p_1}=\frac{2T_2}{T_1}$. Отсюда $p_2=p_1\frac{2T_2}{T_1}$; $p_2=40$ кПа.

Упр 2

1. Какое значение имела бы постоянная Больцмана, если бы единица температуры в СИ — кельвин — была равна не 1°С, а 2°С?

2. Какова средняя кинетическая энергия молекулы аргона, если температура газа 17°С?

3. Современные вакуумные насосы позволяют понижать давление до $1{,}3 \cdot 10^{-10}$ Па (10^{-12} мм. рт. ст.). Сколько молекул газа содержится в 1 $см^3$ при указанном давлении и температуре 27°С?

4. Где больше молекул: в комнате объемом 50 $м^3$ при нормальном атмосферном давлении и температуре 20°С или в стакане воды объемом 200 $см^3$?

5. Средняя квадратическая скорость молекулы газа, находящегося при температуре 100°С, равна 540 м/с. Определить массу молекулы.

6. На сколько процентов увеличивается средняя квадратическая скорость молекул воды в нашей крови при повышении температуры от 37 до 40°С?

КРАТКИЕ ИТОГИ ГЛАВЫ II

Внутреннее состояние макроскопических тел определяется величинами, называемыми макроскопическими параметрами. К их числу относятся давление, объем и температура. Температура является мерой интенсивности теплового движения молекул и характеризует состояние теплового равновесия термодинамической системы. При тепловом равновесии не происходит никаких макроскопических процессов и все макроскопические параметры остаются неизменными, а температура имеет одно и то же значение во всех частях системы. При контакте между телами тело с большей температурой передает энергию телу с меньшей температурой до тех пор, пока температуры их не выравняются.

Температуру измеряют термометрами. В любом термометре используется изменение какого-либо термодинамического параметра в зависимости от изменения температуры.

В отличие от жидкостей и твердых тел все разреженные газы при нагревании одинаковым образом меняют объем при постоянном давлении или давление при постоянном объеме. По этой причине для установления температурной шкалы используют разреженные газы (газовая шкала температур).

Опыт показывает, что отношение $\frac{pV}{N}$ при тепловом равновесии газов одинаково для всех газов и зависит только от температуры. Поэтому оно может быть использовано для определения температуры T по формуле $\frac{pV}{T}=kT$, где $k=1{,}38\times$ $\times 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана.

В физике наибольшее распространение получила абсолютная шкала температур, или шкала Кельвина. Абсолютная температура $T=t+273$, где t — температура по шкале Цельсия. Минимальной температуре соответствует нуль по шкале Кельвина

(абсолютный нуль температуры, равный —273°С). Температуру измеряют в кельвинах. Один кельвин равен градусу по шкале Цельсия.

Сопоставляя выражение для давления, даваемое основным уравнением молекулярно-кинетической теории с формулой $\frac{pV}{N}=kT$, определяющей температуру, получают важнейший результат: средняя кинетическая энергия хаотического движения молекул прямо пропорциональна абсолютной температуре: $\overline{E}=\frac{3}{2}kT$.

Средняя скорость молекул вычисляется по формуле $\overline{v}=\sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$ и составляет при 0°С несколько сот метров в секунду.

Глава III.
УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

12. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Уравнение состояния. Мы детально рассмотрели поведение идеального газа с точки зрения молекулярно-кинетической теории. Была определена зависимость давления газа от концентрации его молекул и температуры (формула 2.10). На основе этой зависимости можно получить уравнение, связывающее все три макроскопических параметра p, V и T, характеризующие состояние данной массы достаточно разреженного газа. Это уравнение называют уравнением состояния идеального газа

Подставим в уравнение (2.10) $p=nkT$ выражение для концентрации газа. Учитывая формулы (1.3) и (1.7), концентрацию газа можно представить следующим образом:

$$n=\frac{N}{V}=\frac{1}{V}\frac{m}{M}N_A, \tag{3.1}$$

где N_A — постоянная Авогадро, m — масса газа, M — его молярная масса.

После подстановки (3.1) в (2.10) будем иметь:

$$pV=\frac{m}{M}kN_AT. \tag{3.2}$$

Произведение постоянной Больцмана k и постоянной Авогадро N_A называют универсальной газовой постоянной и обозначают буквой R:

$$R=kN_A=1{,}38\cdot10^{-23}\cdot6{,}02\cdot10^{23}\ \text{Дж/(моль}\cdot\text{К)}=$$
$$=8{,}31\ \text{Дж/(моль}\cdot\text{К)}. \tag{3.3}$$

Подставляя в уравнение (3.2) вместо произведения kN_A универсальную газовую постоянную R, получим уравнение состояния для произвольной массы идеального газа:

$$pV=\frac{m}{M}RT. \tag{3.4}$$

Единственная величина в этом уравнении, зависящая от рода газа,— это его молярная масса.

Из уравнения состояния (3.4) вытекает связь между давлением, объемом и температурой идеального газа в двух любых состояниях.

Если индексом *1* обозначить параметры, относящиеся к первому состоянию, а индексом *2* — параметры, относящиеся ко второму состоянию, то согласно уравнению (3.4) для данной массы газа

$$\frac{p_1V_1}{T_1}=\frac{m}{M}R \text{ и } \frac{p_2V_2}{T_2}=\frac{m}{M}R.$$

Правые части этих уравнений одинаковы. Следовательно, должны быть равны и их левые части:

$$\frac{p_1V_1}{T_1}=\frac{p_2V_2}{T_2}=\text{const}. \tag{3.5}$$

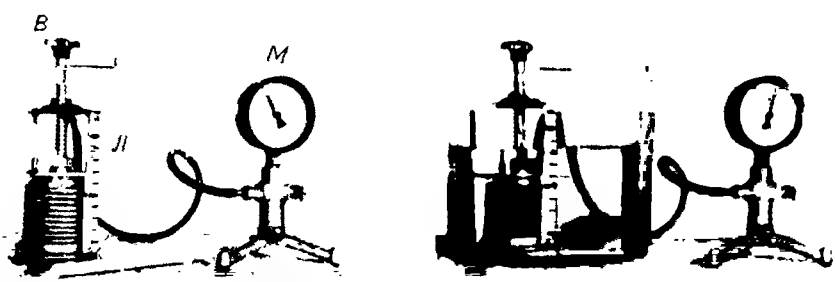
Уравнение состояния в форме (3.5) носит название уравнения Клапейрона[1] и представляет собой одну из форм записи уравнения состояния.

Уравнение состояния в форме (3.4) было впервые получено великим русским ученым Д. И. Менделеевым. Поэтому его называют уравнением Менделеева — Клапейрона.

Экспериментальная проверка уравнения состояния. В справедливости уравнения состояния в форме (3.5) можно убедиться с помощью прибора, изображенного на рисунке 31.

[1] Клапейрон Б. П. (1799–1864) — французский физик; в течение десяти лет работал в России.

а *б* Рис. 31



Менделеев Дмитрий Иванович (1834—1907) — великий русский ученый, создатель периодической системы элементов — одного из самых глубоких обобщений в науке. Д. И. Менделееву принадлежат важнейшие работы по теории газов, взаимным превращениям газов и жидкости (открытие критической температуры, выше которой газ нельзя превратить в жидкость). Передовой общественный деятель, Д. И. Менделеев много сделал для развития производительных сил России, использования полезных ископаемых и развития химического производства.

Герметический гофрированный сосуд соединен с манометром M, регистрирующим давление внутри сосуда. При вращении винта B объем сосуда меняется. Об объеме можно судить с помощью линейки $Л$. Температура газа в сосуде равна температуре окружающего воздуха и регистрируется термометром.

Измеряя давление p, температуру T и объем V газа в начальном состоянии (рис. 31, *а*), можно вычислить отношение $\frac{p_1V_1}{T_1}$ (надо помнить, что T — это абсолютная температура, а не температура по шкале Цельсия).

После этого нужно изменить объем сосуда и нагреть газ, поместив сосуд в горячую воду (рис. 31, *б*). Измерив снова давление газа p_2, объем V_2 и температуру T_2, можно вычислить отношение $\frac{p_2V_2}{T_2}$.

В пределах точности, обеспечиваемой экспериментальной установкой, уравнение состояния (3.5) выполняется. Лишь при давлениях в тысячи атмосфер отклонения результатов эксперимента от предсказываемых уравнением состояния идеального газа, становятся существенными. Плотные газы нельзя даже приближенно считать идеальными.

13. ПРИМЕНЕНИЕ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА К РАЗЛИЧНЫМ ПРОЦЕССАМ

С помощью уравнения состояния идеального газа можно исследовать процессы, в которых масса и один из трех параметров — p, V или T — остаются неизменными. Количественные зависимости между двумя параметрами газа при фиксирован-

ном значении третьего параметра называют газовыми законами.

Процессы, протекающие при неизменном значении одного из параметров, называют изопроцессами[1]. Изопроцессы широко распространены в природе и часто используются в технике.

Изотермический процесс. *Процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянной температуре называют изотермическим.* Для поддержания температуры газа постоянной необходимо, чтобы он мог обмениваться теплотой с большой системой — термостатом. Термостатом может служить атмосферный воздух, если температура его заметно не меняется на протяжении процесса.

Согласно уравнению состояния идеального газа (3.4) в любом состоянии с неизменной температурой произведение давления газа на объем одно и то же:

$$\boxed{pV = \text{const}} \quad \text{при } t = \text{const}. \qquad (3.6)$$

Для данной массы газа произведение давления газа на его объем постоянно, если температура газа не меняется.

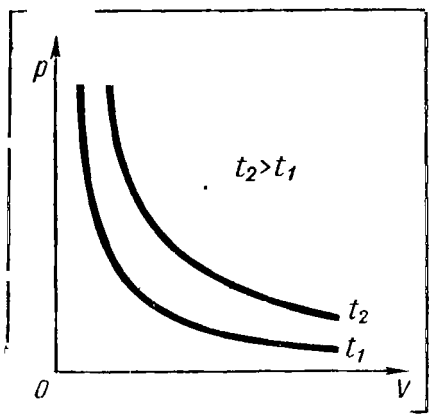
Этот закон был открыт экспериментально английским ученым Бойлем и несколько позднее французским ученым Мариоттом. Поэтому он носит название закона Бойля — Мариотта.

Закон Бойля — Мариотта справедлив для любых газов, а также для смеси газов (например, для воздуха). Лишь при давлениях, в несколько тысяч раз больших атмосферного, отклонения от этого закона становятся существенными.

Убедиться в справедливости закона Бойля — Мариотта при давлениях, близких к атмосферному, можно с помощью установки, описанной в предыдущем параграфе.

Зависимость давления газа от объема при постоянной температуре изображается графически кривой, которая носит название изотермы (рис. 32). Изотерма газа изображает обратно пропорциональную зависимость между давлением и объемом. Кривую такого рода в математике называют гиперболой. Разным постоянным температурам соответствуют различные изотермы. При повышении температуры давление согласно уравнению состояния

Рис. 32



[1] От греческого слова «изос» — равный.

(3.4) увеличивается, если V — const. Поэтому изотерма, соответствующая более высокой температуре T_2, лежит выше изотермы, соответствующей более низкой температуре T_1.

Изобарный процесс. *Процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянном давлении называют изобарным*[1].

Из уравнения состояния идеального газа (3.4) вытекает, что отношение объемов газа данной массы при постоянном давлении равно отношению его абсолютных температур. Действительно, для первого состояния: $pV_1=\frac{m}{M}RT_1$, для второго состояния: $pV_2=\frac{m}{M}RT_2$ (давление постоянно). Отсюда, разделив первое уравнение на второе, получим:

$$\frac{V_1}{V_2}=\frac{T_1}{T_2}\,. \tag{3.7}$$

Если в качестве второго состояния газа выбрать состояние при нормальных условиях (p_0 — нормальное атмосферное давление, $T_0=273$ К — температура таяния льда, V_0 — объем при этих условиях), V_1 и T_1 обозначить через V и T, то из (3.7) следует:

$$V=V_0\frac{1}{T_0}T.$$

Введя обозначение $\alpha=\frac{1}{T_0}=\frac{1}{273}\text{К}^{-1}$, получим:

$$\boxed{V=V_0\alpha T}\,. \tag{3.8}$$

Этот газовый закон был установлен экспериментально в 1802 г. французским ученым Гей-Люссаком и носит название закона Гей-Люссака: **объем данной массы газа при постоянном давлении прямо пропорционален абсолютной температуре.**

Коэффициент α называют температурным коэффициентом объемного расширения газов. Все газы увеличивают свой объем на 1/273 часть того объема, который каждый из газов занимал при 273 К (0°С), если температура меняется на 1 К.

Зависимость объема газа от температуры при постоянном давлении изображается графически прямой, которая называется изобарой (рис. 33).

Различным давлениям соответствуют разные изобары. С ростом давления объем газа при постоянной температуре согласно закону Бойля — Мариотта уменьшается. Поэтому изо-

[1] От греческого слова «барос» —тяжесть, вес.

бара, соответствующая более высокому давлению p_2, лежит ниже изобары, соответствующей более низкому давлению p_1.

В области низких температур все изобары идеального газа пересекаются в точке $T=0$. Но это не означает, что объем реального газа действительно обращается в нуль. Все газы при сильном охлаждении превращаются в жидкости, а к жидкостям уравнение состояния (3.4) не применимо.

Изохорный процесс. *Процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянном объеме называют изохорным*[1].

Из уравнения состояния (3.4) вытекает, что отношение давлений газа данной массы при постоянном объеме равно отношению его абсолютных температур:

$$\frac{p_1}{p_2}=\frac{T_1}{T_2}. \qquad (3.9)$$

Если в качестве одного из состояний газа выбрать состояние газа при нормальных условиях, а p_1 и T_1 обозначить через p и T, то из (3.9) следует:

$$p=p_0\frac{1}{T_0}T.$$

Вводя обозначение $\gamma=\frac{1}{T_0}=\frac{1}{273}$ К$^{-1}$, получим:

$$\boxed{p=p_0\gamma T.} \qquad (3.10)$$

[1] От греческого слова «хорема» — вместимость.

Рис. 33

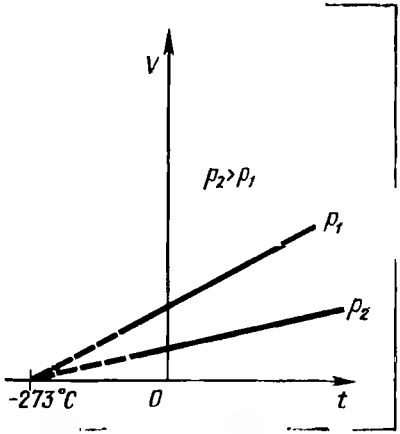
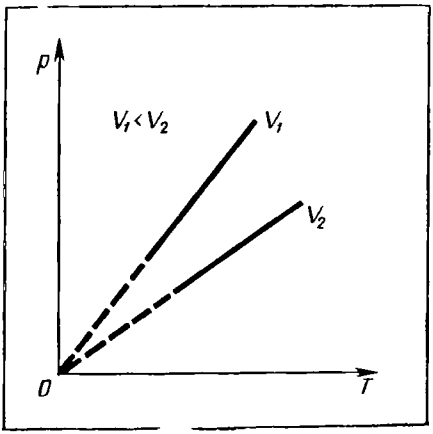


Рис. 34



Этот газовый закон был установлен экспериментально в 1787 г. французским физиком Ж. Шарлем и носит название закона Шарля: **давление данной массы газа при постоянном объеме прямо пропорционально абсолютной температуре.**

Коэффициент γ (равный температурному коэффициенту объемного расширения α) называют температурным коэффициентом давления газа. Он одинаков для всех газов. Все газы увеличивают свое давление на $\frac{1}{273}$ того давления, которое каждый из газов имел при 273 К (0°С), если температура возрастает на 1 К.

Зависимость давления газа от температуры при постоянном объеме изображается графически прямой, которая называется изохорой (рис. 34). Разным объемам соответствуют разные изохоры. С ростом объема газа при постоянной температуре давление его согласно закону Бойля — Мариотта падает. Поэтому изохора, соответствующая большему объему V_2, лежит ниже изохоры, соответствующей объему V_1.

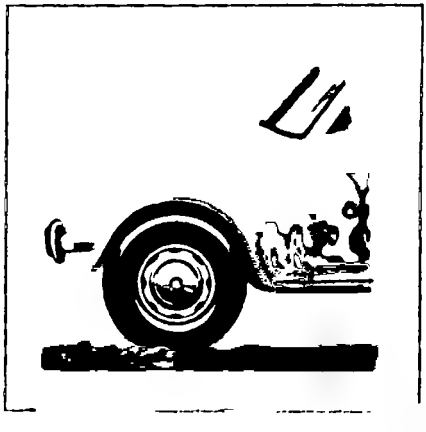
В соответствии с уравнением (3.10) все изохоры начинаются в точке $T=0$. Значит, *давление идеального газа при абсолютном нуле равно нулю.*

14. ПРИМЕНЕНИЕ ГАЗОВ В ТЕХНИКЕ

Газы обладают рядом свойств, которые делают их незаменимыми в очень большом числе технических устройств.

Газ — амортизатор. Большая сжимаемость и легкость газа, возможность регулировки давления делают его одним из самых совершенных амортизаторов, применяемых в ряде устройств.

Рис. 35



Вот как работает автомобильная или велосипедная шина. Когда колесо наезжает на бугорок, то воздух в шине сжимается и толчок, получаемый осью колеса, значительно смягчается (рис. 35). Если бы шина была жесткой, то ось подпрыгнула бы вверх на высоту бугорка.

Газ — рабочее тело двигателей. Большая сжимаемость и сильно выраженная зависимость давления и объема от температуры делают газ незаменимым рабочим телом в двигателях, работающих на сжатом газе, и в тепловых двигателях.

В двигателях, работающих на сжатом газе, например воздухе, газ при расширении совершает работу почти при постоянном давлении. Сжатый воздух, оказывая давление на поршень, открывает двери в автобусах и электропоездах. Сжатым воздухом приводят в движение поршни воздушных тормозов железнодорожных вагонов и грузовиков. Пневматический молоток и другие пневматические инструменты приводятся в движение сжатым воздухом. Даже на космических кораблях имеются небольшие реактивные двигатели, работающие на сжатом газе — гелии. Они ориентируют корабль нужным образом.

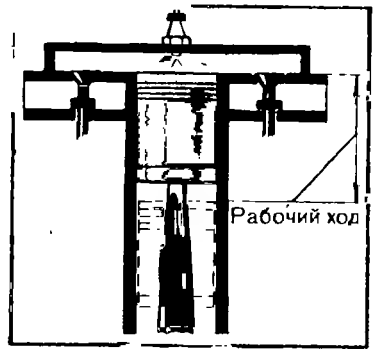


Рис. 36

В двигателях внутреннего сгорания на автомобилях, тракторах, самолетах и в реактивных двигателях в качестве рабочего тела, приводящего поршень, турбину или ракету в движение, используют газы высокой температуры. При сгорании горючей смеси в цилиндре температура резко увеличивается до тысяч градусов, давление на поршень растет и газ, расширяясь, совершает работу на длине рабочего хода поршня (рис. 36).

Только газ можно использовать в качестве рабочего тела в тепловых двигателях. Нагревание жидкого или твердого тела до такой же температуры, как и газа, вызвало бы лишь незначительное перемещение поршня.

Любое огнестрельное оружие, в сущности, является тепловой машиной. Сила давления газов — продуктов сгорания взрывчатых веществ — выталкивает пулю из канала ствола или снаряд из дула орудия. И существенно, что эта сила совершает работу на всей длине канала. Поэтому скорости пули и снаряда оказываются огромными — сотни метров в секунду.

Разреженные газы. Способность к неограниченному расширению приводит к тому, что получение газов при очень малых давлениях — в состоянии вакуума - является сложной технической задачей. (В состоянии вакуума молекулы газа практически не сталкиваются друг с другом, а только со стенками сосуда)

Обычные поршневые насосы из-за просачивания газов между поршнем и стенками цилиндра становятся неэффективными. Получить с их помощью давления ниже десятых долей миллиметра ртутного столба не удается. Приходится применять для откачки газов сложные устройства. В настоящее время достигнуты давления порядка 10^{-10} Па (10^{-12} мм рт. ст.).

Вакуум нужен главным образом в электронных лампах и других электронных приборах. Столкновения электрически за-

ряженных частиц (электронов) с молекулами газа препятствуют нормальной работе этих приборов. Иногда приходится создавать вакуум в очень больших объемах, например в ускорителях элементарных частиц.

Вакуум нужен также для выплавки свободных от примесей металлов, создания термоизоляции и т. д.

1. Что называют уравнением состояния? 2. Сформулируйте уравнение состояния для произвольной массы идеального газа. 3. Чему равна универсальная газовая постоянная? 4. Как связаны давление и объем газа при изотермическом процессе? 5. Как связаны объем и температура при изобарном процессе? 6. Как связаны давление и температура при изохорном процессе? 7. Как можно осуществить изотермический, изобарный и изохорный процессы? 8. Почему в качестве рабочего тела в тепловых двигателях используют только газы?

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

В задачах на использование газовых законов встречаются обычно следующие ситуации:

а) известны макроскопические параметры в начальном состоянии газа и некоторые параметры в конечном состоянии.

Если при переходе из начального состояния в конечное один из параметров не меняется, то при изотермическом процессе можно пользоваться законом Бойля—Мариотта в форме (3.6) или в эквивалентной форме $\frac{p_1}{p_2}=\frac{V_2}{V_1}$, следующей из (3.6). При изобарном процессе нужно пользоваться законом Гей-Люссака (3.8) или (3.7); при изохорном — законом Шарля (3.10) или (3.9).

Если меняются все три параметра, то надо использовать уравнение состояния (3.4) или (3.5);

б) известна часть макроскопических параметров в определенном состоянии газа. Надо найти неизвестные величины. В этих случаях удобнее всего пользоваться уравнением Менделеева — Клапейрона (3.4);

в) во многих задачах требуется построение графиков, изображающих разного рода процессы. Для построения графиков нужно знать зависимость параметров друг от друга. Эта зависимость в общем случае дается уравнением состояния, а в частных случаях — газовыми законами.

При решении всех задач надо четко представлять себе, каково начальное состояние системы и какого рода процесс переводит ее в конечное состояние.

1. Баллон вместимостью $V_1=0{,}02$ м^3, содержащий воздух под давлением $p_1=4\cdot10^5$ Па, соединяют с баллоном вместимостью $V_2=0{,}06$ м^3, из которого воздух выкачан. Найти давление p, установившееся в сосудах. Температура постоянна.

Решение. Воздух из первого баллона займет весь предоставленный ему объем V_1+V_2. По закону Бойля — Мариотта

$$\frac{p}{p_1}=\frac{V_1}{V_1+V_2}.$$

Отсюда искомое давление равно:

$$p=\frac{p_1V_1}{V_1+V_2}, \qquad p=10^5 \text{ Па}.$$

2. На какую долю первоначального объема увеличится объем газа, находящегося при температуре $t=27°C$, если нагреть его на 1°C при постоянном давлении?

Решение. Пусть V_1 и $T_1=273$ К$+t=300$ К — первоначальные значения параметров состояния газа, V_2 и $T_2=T_1+1$ К — конечные значения тех же параметров.

По закону Гей-Люссака

$$\frac{V_2}{V_1}=\frac{T_2}{T_1}.$$

Равенство не изменится, если из левой и правой частей вычесть по единице:

$$\frac{V_2}{V_1}-1=\frac{T_2}{T_1}-1.$$

Отсюда

$$\frac{V_2-V_1}{V_1}=\frac{T_2-T_1}{T_1}; \quad V_2-V_1=\frac{1}{300}V_1.$$

Объем газа увеличится на 1/300 долю первоначального.

3. Плотность воздуха при нормальных условиях (т. е. при $t_0=0°C$ и нормальном атмосферном давлении $p_0=101325$ Па) $\varrho=1{,}29$ кг/м^3. Найти среднюю молярную массу M воздуха.

Решение. Уравнение состояния идеального газа при нормальных условиях имеет вид: $p_0V_0=\frac{m}{M}RT_0$. Здесь $T_0=273$ К и $R=8{,}31$ Дж/(К·моль). Отсюда

$$M=\frac{mRT_0}{V_0p_0}=\frac{\varrho_0T_0}{p_0}R; \qquad M\approx 0{,}029 \text{ кг/моль}.$$

4. Построить изобары для 2 г водорода при нормальном атмосферном давлении p_0 в осях p, T; p,V; V,T.

Решение. На графиках зависимости p от T и p от V изобара будет представлять собой прямую, параллельную либо оси T, либо оси V (рис. 37, *а* и *б*).

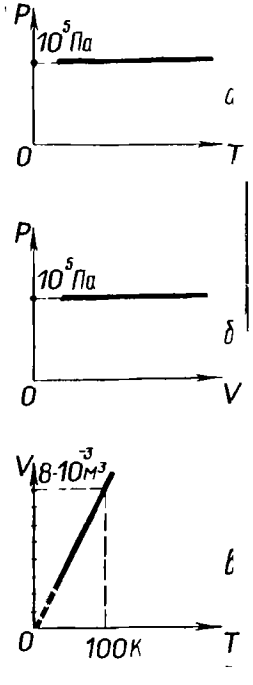


Рис. 37

Так как $V=\frac{m}{M}\frac{R}{p_0}T$, то графиком зависимости V от T является прямая, проходящая через начало отсчета. Учитывая, что $m=0{,}002$ кг, $M=0{,}002$ кг/моль, $R=8{,}31$ Дж/(моль·К) и $p_0\approx 10^5$ Па, можно записать: $V=BT$, где $B=\frac{m}{M}\frac{R}{p_0}\approx 8\cdot 10^{-5}\ \frac{\text{м}^3}{\text{К}}$. В частности, при $T=100$ К $V\approx 8\cdot 10^{-3}$ м^3. График зависимости V от T показан на рисунке 37, *в*.

Упр. 3

1. Газ сжат изотермически от объема $V_1=8$ л до объема $V_2=6$ л. Давление при этом возросло на $\Delta p=4$ кПа. Каким было начальное давление p_1?

2. Компрессор, обеспечивающий работу отбойных молотков, засасывает из атмосферы $V=100$ л воздуха в секунду. Сколько отбойных молотков может работать от этого компрессора, если для каждого молотка необходимо $v=100$ см^3 воздуха в секунду при давлении $p=5$ МПа? Атмосферное давление $p=100$ кПа.

3. Построить изотермы для 2 г водорода при 0°С в координатах

$$p,V;\ V,T \text{ и } p,T.$$

4. Определить температуру газа, находящегося в закрытом сосуде, если давление газа увеличивается на 0,4% первоначального давления при нагревании на 1 К.

5. При переходе определенной массы газа из одного состояния в другое его давление уменьшается, а температура увеличивается. Как меняется его объем?

6. Чему равен объем одного моля идеального газа при нормальных условиях?

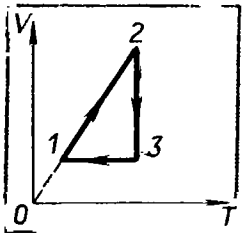
7. Найти массу воздуха в классе, где вы занимаетесь, при температуре 20°С и нормальном атмосферном давлении. Молярную массу воздуха принять равной 0,029 кг/моль.

8. Плотность некоторого газообразного вещества 2,5 кг/м^3 при температуре 10°С и нормальном атмосферном давлении. Найти молярную массу этого вещества.

9. В баллоне объемом 0,03 м^3 находится газ под давлением $1{,}35\cdot 10^6$ Па при температуре 455°С. Какой объем занимал бы этот газ при нормальных условиях ($t_0=0$°С, $p_0=101\ 325$ Па)?

10. Высота пика Ленина на Памире равна 7134 м. Атмосферное давление на этой высоте $3{,}8\cdot 10^4$ Па. Определить плотность воздуха на вершине пика при 0°С, если плотность воздуха при нормальных условиях 1,29 кг/м^3.

Рис. 38



11. На рисунке 38 дан график изменения состояния идеального газа в координатах V,T. Представить этот процесс на графиках в координатах p,V и p,T.

12. Выразить среднюю квадратическую скорость молекулы через универсальную газовую постоянную и молярную массу.

13. В баллоне находится газ при температуре 15° С. Во сколько раз уменьшится давление газа, если 40% его выйдет из баллона, а температура при этом понизится на 8°С?

КРАТКИЕ ИТОГИ ГЛАВЫ III

Между термодинамическими параметрами существует связь, даваемая уравнением состояния. Все достаточно разреженные газы (идеальные газы) подчиняются уравнению состояния Менделеева — Клапейрона:

$$pV=\frac{m}{M}RT,$$

где p — давление, V — объем, m — масса газа, M — молярная масса, T — абсолютная температура, $R=8{,}31$ Дж/(К·моль) — универсальная газовая постоянная.

Уравнение состояния содержит в себе в качестве частных случаев газовые законы, связывающие изменение двух термодинамических параметров при неизменном значении третьего:

для данной массы газа при $T=\text{const}$ $pV=\text{const}$ (закон Бойля — Мариотта);

при $p=\text{const}$ $V=V_0\alpha T$ (закон Гей-Люссака), где V_0 — объем при 0°С, α — температурный коэффициент объемного расширения, $\alpha\approx\frac{1}{273}\text{К}^{-1}$;

при $V=\text{const}$ $p=p_0\gamma T$ (закон Шарля), где p_0 — давление при 0°С, а $\gamma=\alpha\approx\frac{1}{273}\text{К}^{-1}$ — температурный коэффициент давления.

Глава IV.
ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

15. ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ

Из курса физики VII класса известно, что любое макроскопическое тело обладает внутренней энергией.

Понятие внутренней энергии макроскопических тел играет важнейшую роль при исследовании тепловых явлений. Это обусловлено существованием фундаментального закона природы — закона сохранения энергии.

Открытие закона сохранения энергии стало возможным после того, как было доказано, что наряду с механической энергией *макроскопические тела обладают еще и внутренней энергией, заключенной внутри самих тел. Эта энергия входит в общий баланс энергетических превращений в природе.*

Когда скользящая по льду шайба останавливается под действием силы трения, то ее механическая (кинетическая) энергия не просто исчезает, а передается хаотически движущимся молекулам льда и шайбы. Неровности поверхностей

трущихся тел деформируются при движении, и интенсивность хаотического движения молекул возрастает. Оба тела нагреваются, что и означает увеличение их внутренней энергии.

Нетрудно наблюдать обратный переход внутренней энергии в механическую. Если нагревать воду в пробирке, закрытой пробкой, то внутренняя энергия воды начнет возрастать. Вода закипит и давление пара увеличится настолько, что пробка будет выбита и полетит вверх. Кинетическая энергия пробки увеличивается за счет внутренней энергии пара. Расширяясь, водяной пар совершает работу и охлаждается. Его внутренняя энергия при этом уменьшается.

С точки зрения молекулярно-кинетической теории внутренняя энергия макроскопического тела равна сумме кинетических энергий хаотического движения всех молекул (или атомов) относительно центра масс тела и потенциальных энергий взаимодействия всех молекул друг с другом (но не с молекулами других тел) Вычислить внутреннюю энергию тела (или ее изменение), учитывая движение отдельных молекул и их положения друг относительно друга, практически невозможно из-за огромного числа молекул в макроскопических телах. Необходимо поэтому уметь определять внутреннюю энергию (или ее изменение) в зависимости от макроскопических параметров, которые можно непосредственно измерять.

Внутренняя энергия идеального одноатомного газа. Наиболее прост по своим свойствам одноатомный газ, состоящий из отдельных атомов, а не молекул. Одноатомными являются инертные газы — гелий, неон, аргон и др. Вычислим внутреннюю энергию идеального одноатомного газа.

Так как молекулы идеального газа не взаимодействуют друг с другом, за исключением коротких интервалов времени, когда они сталкиваются, их потенциальная энергия считается равной нулю. *Вся внутренняя энергия идеального газа представляет собой кинетическую энергию теплового движения его молекул.*

Для вычисления внутренней энергии идеального одноатомного газа массы m нужно умножить среднюю энергию (2.9) одного атома на число атомов. Это число равно произведению количества вещества $\nu=\frac{m}{M}$ на постоянную Авогадро N_A (см. § 2, формулы 1.3 и 1.7).

Умножая (2.9) на $\frac{m}{M}N_A$, получим внутреннюю энергию идеального одноатомного газа.

$$\boxed{U=\frac{m}{M}\frac{3}{2}RT.} \qquad (4.1)$$

Внутренняя энергия идеального одноатомного газа прямо пропорциональна его абсолютной температуре.

Если идеальный газ состоит из более сложных молекул, чем одноатомный, то его внутренняя энергия также пропорциональна абсолютной температуре, но коэффициент пропорциональности между U и T другой. Объясняется это тем, что сложные молекулы не только движутся поступательно, но и вращаются. Внутренняя энергия таких газов равна сумме энергий поступательного и вращательного движения молекул.

Зависимость внутренней энергии от макроскопических параметров. Мы установили, что внутренняя энергия идеального газа зависит от одного параметра — температуры. От объема внутренняя энергия идеального газа не зависит потому, что потенциальная энергия взаимодействия его молекул считается равной нулю.

У реальных газов, жидкостей и твердых тел средняя потенциальная энергия взаимодействия молекул не равна нулю. Правда, для газов она много меньше средней кинетической энергии, но для твердых и жидких тел сравнима с кинетической. Средняя потенциальная энергия взаимодействия молекул зависит от объема вещества, так как при изменении объема меняется среднее расстояние между молекулами. Следовательно, **внутренняя энергия в общем случае наряду с температурой T зависит еще и от объема V.**

Так как значения макроскопических параметров T,V и других однозначно определяют состояние тел, то, следовательно, они определяют и внутреннюю энергию макроскопических тел.

Внутренняя энергия U макроскопических тел однозначно определяется параметрами, характеризующими состояние тел:

$$U=U(T, V).$$

Для идеального одноатомного газа это уравнение принимает форму (4.1).

Теперь рассмотрим, в результате каких процессов может меняться внутренняя энергия. Из курса физики VII класса известно, что существует два рода таких процессов: совершение работы и передача теплоты. Вначале более детально, чем в VII классе, рассмотрим работу в термодинамике.

16. РАБОТА В ТЕРМОДИНАМИКЕ

Работа в механике и термодинамике. В механике работа определяется как произведение модулей силы и перемещения, умноженное на косинус угла между ними. Работа совершается при действии силы на движущееся тело и равна изменению кинетической энергии тела.

В термодинамике движение тела как целого не рассматривается и речь идет о перемещении частей макроскопического тела друг относительно друга. В результате меняется объем

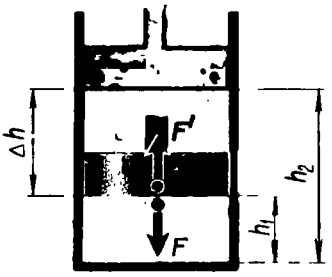


Рис. 39

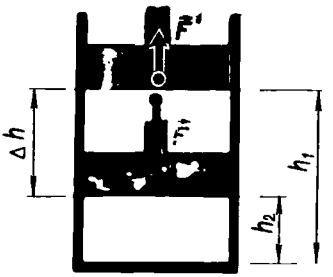


Рис. 40

тела, а его скорость остается равной нулю. Следовательно, работа в термодинамике, определяемая так же, как и в механике, равна изменению не кинетической энергии тела, а его внутренней энергии.

Изменение внутренней энергии при совершении работы. Почему при сжатии или расширении меняется внутренняя энергия тела? Почему, в частности, нагревается воздух при накачивании велосипедной шины?

Причина изменения температуры в процессе сжатия газа состоит в следующем: *при упругих соударениях молекул с движущимся поршнем их кинетическая энергия изменяется.* При движении навстречу молекулам поршень передает им во время столкновений часть своей механической энергии, в результате чего газ нагревается. Поршень действует подобно футболисту, встречающему летящий мяч ударом ноги и сообщающему мячу скорость, значительно бóльшую той, которой он обладал до удара.

Если газ, напротив, расширяется, то после столкиовения с удаляющимся поршнем скорости молекул уменьшаются, в результате чего газ охлаждается. Так же действует футболист, для того чтобы уменьшить скорость летящего мяча или остановить его; нога футболиста движется от мяча, как бы уступая ему дорогу.

При сжатии или расширении меняется и средняя потенциальная энергия взаимодействия молекул, так как при этом меняется среднее расстояние между молекулами.

Вычисление работы. Вычислим работу в зависимости от изменения объема на примере газа в цилиндре под поршнем (рис. 39). Проще всего вначале вычислить не работу силы $\vec{F}$, действующей на газ со стороны внешнего тела (поршня), а работу, которую совершает сам газ, действуя на поршень с силой $\vec{F}'$. Согласно третьему закону Ньютона $\vec{F}' = -\vec{F}$.

Модуль силы, действующей со стороны газа на поршень, равен: $F' = pS$, где p — давление газа, а S — площадь поршня. Пусть газ расширяется и поршень смещается в направлении

силы $\vec{F}'$ на малое расстояние $\Delta h = h_2 - h_1$. Если перемещение мало, то давление газа можно считать постоянным.

Работа газа равна:

$$A' = F'\Delta h = pS(h_2 - h_1) = p(Sh_2 - Sh_1). \qquad (4.2)$$

Эту работу можно выразить через изменение объема газа. Начальный объем $V_1 = Sh_1$, а конечный $V_2 = Sh_2$. Поэтому

$$A' = p(V_2 - V_1) = p\Delta V, \qquad (4.3)$$

где $\Delta V = V_2 - V_1$ — изменение объема газа.

При расширении газ совершает положительную работу, так как направление силы и направление перемещения поршня совпадают. В процессе расширения газ передает энергию окружающим телам.

Если газ сжимается, то формула (4.3) для работы газа остается справедливой. Но теперь $V_2 < V_1$, и поэтому $A' < 0$ (рис. 40).

Работа A, совершаемая внешними телами над газом, отличается от работы газа A' только знаком: $A = -A'$, так как сила $\vec{F}$, действующая на газ, направлена против силы $\vec{F}'$, а перемещение остается тем же самым. Поэтому работа внешних сил, действующих на газ, равна:

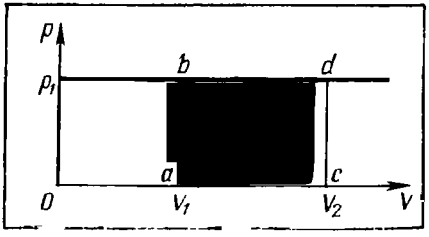
$$\boxed{A = -A' = -p\Delta V.} \qquad (4.4)$$

Знак минус указывает, что при сжатии газа, когда $\Delta V = V_2 - V_1 < 0$, работа внешней силы положительна. Понятно, почему в этом случае $A > 0$: при сжатии газа направления силы и перемещения совпадают. Совершая над газом положительную работу, внешние тела передают ему энергию. При расширении газа, наоборот, работа внешних тел отрицательна ($A < 0$), так как $\Delta V = V_2 - V_1 > 0$. Теперь направления силы и перемещения противоположны.

Выражения (4.3) и (4.4) справедливы не только при сжатии или расширении газа в цилиндре, но и при малом изменении объема любой системы. Если процесс изобарный ($p = \text{const}$), то эти формулы можно применять и для больших изменений объема.

Геометрическое истолкование работы. Работе A' газа для случая постоянного давления можно дать простое геометрическое истолкование.

Рис. 41



Построим график зависимости давления газа от объема (рис. 41). Здесь площадь прямоугольника $abdc$, ограниченная графиком $p_1 = \text{const}$, осью V и отрезками ab и cd,

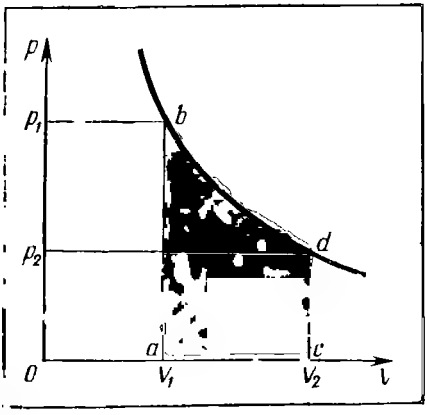


Рис. 42

равными давлению газа, численно равна работе (4.3).

В общем случае при произвольном изменении объема газа давление не остается неизменным. Например, при изотермическом процессе оно убывает обратно пропорционально объему (рис. 42). В этом случае для вычисления работы нужно разделить общее изменение объема на малые части, вычислить элементарные (малые) работы, а потом все их сложить. Работа газа по-прежнему будет численно равна площади фигуры, ограниченной графиком зависимости p от V, осью V и отрезками ab и cd, равными давлениям p_1, p_2 в начальном и конечном состояниях.

? **1. От каких физических величин зависит внутренняя энергия тела? 2. Приведите примеры превращения механической энергии во внутреннюю и обратно в технике и быту. 3. Чему равна внутренняя энергия идеального одноатомного газа? 4. Моль какого газа — водорода или гелия — имеет большую внутреннюю энергию при одинаковой температуре газов? 5. Почему газ при сжатии нагревается? 6. Чему равна работа, совершаемая внешними силами при сжатии и расширении тел?**

17. КОЛИЧЕСТВО ТЕПЛОТЫ[1]

Изменить внутреннюю энергию газа в цилиндре можно не только совершая работу, но и нагревая газ (рис. 43). Если закрепить поршень, то объем газа не будет изменяться, но температура, а следовательно, и внутренняя энергия будут возрастать.

Процесс передачи энергии от одного тела к другому без совершения работы называют теплообменом или теплопередачей.

Энергию, переданную телу в результате теплообмена, называют количеством теплоты. Количеством теплоты называют также энергию, которую тело отдает в процессе теплообмена.

Молекулярная картина теплообмена. При теплообмене на границе между телами происходит взаимодействие медленно движущихся молекул холодного тела с более быстро движущимися молекулами горячего тела. В результате кинетические энергии

[1] В этом параграфе главным образом кратко повторяются сведения о количестве теплоты, известные из курса физики VII класса.

молекул выравниваются и скорости молекул холодного тела увеличиваются, а горячего уменьшаются.

При теплообмене не происходит превращения энергии из одной формы в другую: часть внутренней энергии горячего тела передается холодному телу.

Количество теплоты и теплоемкость. Из курса физики VII класса известно, что для нагревания тела массой m от температуры t_1 до температуры t_2 необходимо сообщить ему количество теплоты

$$Q = cm(t_2 - t_1) = cm\Delta t. \qquad (4.5)$$

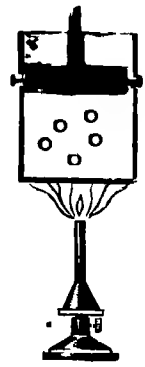


Рис. 43

При остывании тела его конечная температура t_2 меньше начальной t_1 и количество теплоты, отдаваемое телом, отрицательно.

Коэффициент c в формуле (4.5) называют удельной теплоемкостью. **Удельная теплоемкость — это количество теплоты, которое получает или отдает 1 кг вещества при изменении его температуры на 1 К.**

Удельную теплоемкость выражают в джоулях, деленных на килограмм, умноженный на кельвин. Различным телам требуется неодинаковое количество энергии для увеличения температуры на 1 К. Так, удельная теплоемкость воды 4190 Дж/(кг·К), а меди 380 Дж/(кг·К).

Удельная теплоемкость зависит не только от свойств вещества, но и от того, при каком процессе осуществляется теплопередача. Если нагревать газ при постоянном давлении, то он будет расширяться и совершать работу. Для нагревания газа на 1°С при постоянном давлении ему нужно будет передать большее количество теплоты, чем для нагревания его при постоянном объеме.

Жидкие и твердые тела расширяются при нагревании незначительно, и их удельные теплоемкости при постоянном объеме и постоянном давлении мало различаются.

Удельная теплота парообразования. Для превращения жидкости в пар необходима передача ей определенного количества теплоты. Температура жидкости при этом превращении не меняется. Превращение жидкости в пар при постоянной температуре не ведет к увеличению кинетической энергии молекул, но сопровождается увеличением их потенциальной энергии. Ведь среднее расстояние между молекулами газа во много раз больше, чем между молекулами жидкости. Кроме того, увеличение объема при переходе вещества из жидкого состояния в газообразное требует совершения работы против сил внешнего давления.

Количество теплоты, необходимое для превращения при постоянной температуре 1 кг жидкости в пар, называют удель-

ной теплотой парообразования. Обозначают эту величину буквой r и выражают в джоулях на килограмм.

Очень велика удельная теплота парообразования воды: $2{,}256 \cdot 10^6$ Дж/кг при температуре 100°С. У других жидкостей (спирт, эфир, ртуть, керосин и др.) удельная теплота парообразования меньше в 3—10 раз.

Для превращения в пар жидкости массой m требуется количество теплоты, равное:

$$Q_п = rm. \tag{4.6}$$

При конденсации пара происходит выделение такого же количества теплоты:

$$Q_k = -rm. \tag{4.7}$$

Удельная теплота плавления. При плавленнн кристаллического тела вся подводимая к нему теплота идет на увеличение потенциальной энергии молекул. Кинетическая энергия молекул не меняется, так как плавление происходит при постоянной температуре.

Количество теплоты λ[1], необходимое для превращения 1 кг кристаллического вещества при температуре плавления в жидкость той же температуры, называют удельной теплотой плавления.

При кристаллизации 1 кг вещества выделяется точно такое же количество теплоты. Удельная теплота плавления льда довольно велика: $3{,}4 \cdot 10^5$ Дж/кг.

Для того чтобы расплавить кристаллнческое тело массой m, необходимо количество теплоты, равное:

$$Q_{пл} = \lambda m. \tag{4.8}$$

Количество теплоты, выделяемое при кристаллизации тела, равно:

$$Q_{кр} = -\lambda m. \tag{4.9}$$

1. Что называют количеством теплоты? 2. От чего зависит удельная теплоемкость веществ? 3. Что называют удельной теплотой парообразования? 4. Что называют удельной теплотой плавления? 5. В каких случаях количество переданной теплоты отрицательно?

18. ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Закон сохранения энергии. К середине XIX в. многочисленные опыты ученых доказали, что механическая энергия никогда не пропадает бесследно. Опускаются гири, вращающие лопасти в сосуде с ртутью, и температура ртути повышается на строго

[1] λ — греческая буква, читается: «лямбда».

определенное число градусов. Падает молот на кусок свинца, и свинец нагревается тоже вполне определенным образом.

На основании множества подобных наблюдений и обобщения опытных фактов был сформулирован закон сохранения энергии:

Энергия в природе не возникает из ничего и не исчезает: количество энергии неизменно, она только переходит из одной формы в другую.

Закон сохранения энергии управляет всеми явлениями природы и связывает их воедино. Он выполняется абсолютно точно: не известно ни одного случая, когда бы этот закон не выполнялся.

Этот закон был открыт в середине XIX в. немецким ученым, врачом по образованию, Р. Майером (1814—1878), английским ученым Д. Джоулем (1818—1889) и получил наиболее полную формулировку в трудах немецкого ученого Г. Гельмгольца (1821—1894).

Первый закон термодинамики. *Закон сохранения и превращения энергии, распространенный на тепловые явления, носит название первого закона термодинамики.*

В термодинамике рассматриваются тела, положение центра тяжести которых практически не изменяется. Механическая энергия тел остается постоянной, изменяться может лишь внутренняя энергия.

До сих пор мы рассматривали процессы, в которых внутренняя энергия системы менялась либо за счет совершения работы, либо за счет теплообмена с окружающими телами. В общем случае при переходе системы из одного состояния в другое внутренняя энергия будет меняться одновременно как за счет совершения работы, так и за счет передачи теплоты. Первый закон термодинамики формулируется именно для таких общих случаев:

Изменение внутренней энергии системы при переходе ее из одного состояния в другое равно сумме работы внешних сил и количества теплоты, переданного системе:

$$\Delta U = A + Q. \qquad (4.10)$$

Первый закон термодинамики (4.10) связывает изменение внутренней энергии с изменением макроскопических параметров V и T, так как через изменения этих параметров выражается работа и количество теплоты.

В частном случае изолированной системы над ней не совершается работа ($A=0$), и она не обменивается теплотой с окружающими телами ($Q=0$). Согласно первому закону термодинамики в этом случае $\Delta U = U_2 - U_1 = 0$, или $U_1 = U_2$. *Внутренняя энергия изолированной системы остается неизменной* (сохраняется).

Часто вместо работы A внешних тел над системой рассматривают работу A' системы над внешними телами. Учитывая,

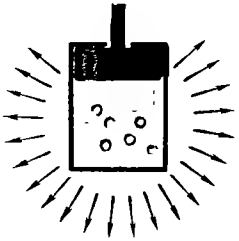


Рис. 44

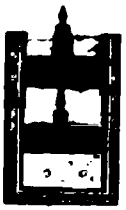


Рис. 45

что $A' = -A$ (см. § 16), первый закон термодинамики (4.10) можно записать так:

$$Q = \Delta U + A'. \qquad (4.11)$$

Количество теплоты, переданное системе, идет на изменение ее внутренней энергии и на совершение системой работы над внешними телами.

Невозможность создания вечного двигателя. Из первого закона термодинамики вытекает невозможность создания вечного двигателя — устройства, способного совершать неограниченное количество работы без затрат топлива или каких-либо других материалов. Если к системе не поступает теплота ($Q = 0$), то работа A' согласно (4.11) может быть совершена только за счет убыли внутренней энергии: $A' = -\Delta U$. После того как запас энергии окажется исчерпанным, двигатель перестанет работать.

Работа и количество теплоты — характеристики процесса изменения энергии. В данном состоянии система всегда обладает определенной внутренней энергией. Но *нельзя говорить, что в ней содержится определенное количество теплоты или работы.* Как работа, так и количество теплоты являются величинами, характеризующими изменение энергии системы в результате того или иного процесса.

Внутренняя энергия системы может измениться одинаково как за счет совершения системой работы, так и за счет передачи окружающим телам какого-то количества теплоты. Нагретый газ в цилиндре может уменьшить свою энергию, остывая, без совершения работы (рис. 44). Но он может потерять точно такое же количество энергии, перемещая поршень, без отдачи теплоты окружающим телам. Для этого стенки цилиндра и поршень должны быть теплонепроницаемыми (рис. 45).

В дальнейшем на протяжении всего курса физики мы будем знакомиться с различными другими формами энергии, способами их превращения и передачи.

19. ПРИМЕНЕНИЕ ПЕРВОГО ЗАКОНА ТЕРМОДИНАМИКИ К РАЗЛИЧНЫМ ПРОЦЕССАМ

С помощью первого закона термодинамики можно делать важные заключения о характере протекающих процессов. Рассмотрим различные процессы, при которых одна из физических величин остается неизменной (изопроцессы). Пусть система представляет собой идеальный газ. Это самый простой случай.

Изохорный процесс. При изохорном процессе объем не меняется и поэтому работа газа равна нулю. Изменение энергии согласно уравнению (4.11) равно количеству переданной теплоты:

$$\Delta U = Q. \tag{4.12}$$

Если газ нагревается, то $Q>0$ и $\Delta U>0$, его внутренняя энергия увеличивается. При охлаждении газа $Q<0$ и $\Delta U = U_2 - U_1 <0$, изменение внутренней энергии отрицательно и внутренняя энергия газа уменьшается.

Изотермический процесс. При изотермическом процессе ($T=\text{const}$) внутренняя энергия идеального газа (4.1) не меняется. Согласно формуле (4.11) все переданное системе количество теплоты идет на совершение работы:

$$Q = A'. \tag{4.13}$$

Если газ получает теплоту ($Q>0$), то он совершает положительную работу $A'>0$. Если, напротив, газ отдает теплоту окружающей среде (термостату), то $Q<0$ и $A'<0$. Работа же внешних сил над газом в последнем случае положительна.

Изобарный процесс. При изобарном процессе согласно формуле (4.11) передаваемое системе количество теплоты идет на изменение внутренней энергии системы и совершение работы при постоянном давлении.

Если газ нагревается ($Q>0$), то он расширяется и совершает положительную работу ($A'>0$). Одновременно увеличивается его внутренняя энергия ($\Delta U>0$).

При охлаждении ($Q<0$) газ сжимается и внешние силы совершают над ним положительную работу ($A>0$), его внутренняя энергия уменьшается ($\Delta U<0$).

Адиабатный процесс. С рассмотренными выше изопроцессами вы ознакомилнсь в третьей главе, до изучения первого закона термодинамики. Теперь речь пойдет о процессе, протекающем в системе, не обменивающейся теплотой с окружающими телами. *Процесс в теплоизолированной системе называют адиабатным.*

При адиабатном процессе $Q=0$ и согласно (4.10) изменение внутренней энергии происходит только за счет совершения работы:

$$\Delta U = A. \tag{4.14}$$

Конечно, нельзя окружить систему оболочкой, абсолютно не допускающей теплопередачи. Но в ряде случаев можно считать реальные процессы очень близкими к адиабатным. Для этого они должны протекать достаточно быстро, так, чтобы за время процесса не произошло заметного теплообмена между системой и окружающими телами.

Согласно уравнению (4.14) при совершении над системой положительной работы, например при сжатии газа, внутренняя

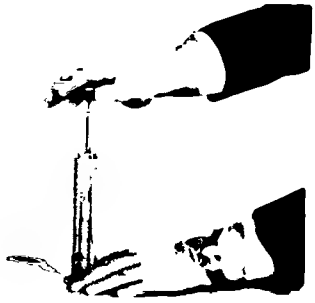


Рис. 46

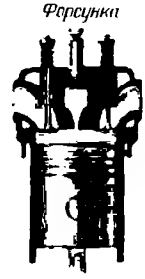


Рис. 47

энергия его увеличивается. Это означает повышение температуры газа. Наоборот, при расширении сам газ совершает положительную работу ($A' > 0$) и внутренняя энергия его уменьшается — газ охлаждается.

Нагревание газа при быстром сжатии можно продемонстрировать с помощью прозрачного цилиндра с плотно пригнанным поршнем (рис. 46). Если положить на дно цилиндра смоченный эфиром кусочек ватки и быстро опустить поршень вниз, то пары эфира воспламенятся.

Нагревание воздуха при быстром сжатии нашло применение в двигателях Дизеля. В этих двигателях отсутствует система зажигания горючей смеси, необходимая для обычных бензиновых двигателей внутреннего сгорания. В цилиндр засасывается не горючая смесь, а атмосферный воздух. К концу такта сжатия в цилиндр с помощью специальной форсунки впрыскивается жидкое топливо (рис. 47). К этому моменту температура воздуха так велика, что горючее воспламеняется.

При работе мощных компрессоров, сжимающих воздух, температура воздуха настолько увеличивается, что приходится прибегать к специальной системе охлаждения цилиндров. Адиабатное охлаждение газов при расширении используется в машинах для сжижения газов.

Охлаждение газа при адиабатном расширении происходит в грандиозных масштабах в атмосфере Земли. Нагретый воздух поднимается вверх и расширяется, так как атмосферное давление падает с увеличением высоты. Это расширение сопровождается значительным охлаждением. В результате водяные пары конденсируются и образуются облака.

Теплообмен в замкнутой системе. Рассмотрим теплообмен внутри системы, состоящей из нескольких тел, имеющих первоначально различные температуры, например теплообмен между водой в сосуде и опущенным в воду горячим железным шариком. Будем считать, что система достаточно изолирована от окружающих тел и ее внутренняя энергия не меняется (замкну-

тая система). Никакой работы внутри системы не совершается. Тогда согласно первому закону термодинамики (4.10) изменение энергии любого тела системы равно количеству теплоты, отданной или полученной этим телом до наступления теплового равновесия внутри системы $\Delta U_i = Q_i$. Складывая подобные выражения для всех тел системы и учитывая, что суммарная внутренняя энергия не меняется $(\Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3 + ... = 0)$, получим следующее уравнение:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + ... = 0. \qquad (4.15)$$

Это уравнение носит название уравнения теплового баланса. Здесь Q_1, Q_2, Q_3,... - количества теплоты, полученные или отданные телами. Эти количества теплоты выражаются формулой (4.5) или формулами (4.6), (4.7), (4.8), (4.9), если в процессе теплообмена происходят превращения вещества из жидкого состояния в газообразное или твердое (или, напротив, образуется жидкость).

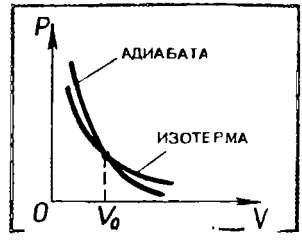
Уравнение теплового баланса вначале было открыто экспериментально при наблюдении теплообмена между телами в калориметре — приборе, максимально изолирующем тела от воздействий окружающей среды. С устройством калориметра вы познакомились в VII классе.

? **1. Как формулируется первый закон термодинамики? 2. В каких случаях изменение внутренней энергии отрицательно? 3. В каком случае работа газа будет больше: при изотермическом расширении от объема V_1 до объема V_2 или при изобарном расширении от объема V_1 до объма V_2? 4. Почему нельзя говорить, что система обладает запасом определенного количества теплоты или работы? 5. Какой процесс называют адиабатным? 6. На рисунке 48 изображены зависимости давления от объема при адиабатном и изотермическом процессах. Почему адиабата идет круче изотермы? 7. Запишите уравнение теплового баланса.**

20. НЕОБРАТИМОСТЬ ПРОЦЕССОВ В ПРИРОДЕ

Закон сохранения энергии утверждает, что количество энергии при любых ее превращениях остается неизменным. Но он ничего не говорит о том, какие энергетические превращения возможны. Между тем многие процессы, вполне допустимые с точки зрения закона сохранения энергии, никогда не протекают в действительности.

Рис. 48



Примеры необратимых процессов. Нагретые тела постепенно остывают, передавая свою энергию более холодным окружающим телам. Обратный процесс передачи теплоты от холод-

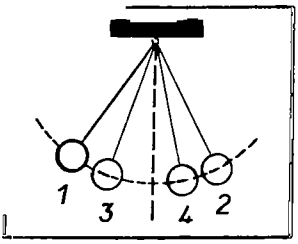


Рис. 49

ного тела к горячему не противоречит закону сохранения энергии, но такой процесс никогда не наблюдался.

Другой пример. Колебания маятника, выведенного из положения равновесия, затухают (рис. 49; *1, 2, 3, 4* — последовательные положения маятника при максимальных отклонениях от положения равновесия). За счет работы сил трения механическая энергия убывает, а температура маятника и окружающего воздуха (а значит, и их внутренняя энергия) слегка повышается. Энергетически допустим и обратный процесс, когда амплитуда колебаний маятника увеличивается за счет охлаждения самого маятника и окружающей среды. Но такой процесс никогда не наблюдался. Механическая энергия самопроизвольно переходит во внутреннюю, но не наоборот. При этом упорядоченное движение тела как целого превращается в неупорядоченное тепловое движение слагающих его молекул.

Общее заключение о необратимости процессов в природе. Переход теплоты от горячего тела к холодному и механической энергии во внутреннюю — это примеры наиболее типичных необратимых процессов. Число подобных примеров можно увеличить практически неограниченно. Все они говорят о том, что процессы в природе имеют определенную направленность, никак не отраженную в первом законе термодинамики. *Все макроскопические процессы в природе протекают только в одном определенном направлении. В обратном направлении они самопроизвольно протекать не могут.* Все процессы в природе необратимы, и самые трагические из них — старение и смерть организмов.

Точная формулировка понятия необратимого процесса. Для правильного понимания существа необратимости процессов необходимо сделать следующее уточнение. **Необратимым называется такой процесс, обратный которому может протекать только как одно из звеньев более сложного процесса.** Так, можно вновь увеличить размах колебаний маятника, подтолкнув его рукой. Но это увеличение возникает не само собой, а становится возможным в результате более сложного процесса, включающего движение руки.

Можно в принципе перевести теплоту от холодного тела к горячему. Но для этого нужна холодильная установка, потребляющая энергию.

Кино «наоборот». Яркой иллюстрацией необратимости явлений в природе служит просмотр кинофильма в обратном направлении. Например, прыжок в воду будет при этом выглядеть следующим образом. Спокойная вода в бассейне начинает бурлить, появляются ноги, стремительно движущиеся вверх, а затем

и весь ныряльщик. Поверхность воды быстро успокаивается. Постепенно скорость ныряльщика уменьшается, и вот уже он спокойно стоит на вышке. То, что мы видим на экране, могло бы происходить в действительности, если бы процессы можно было обратить. «Нелепость» происходящего проистекает из того, что мы привыкли к определенной направленности процессов и не сомневаемся в невозможности их обратного течения. А ведь такой процесс, как вознесение ныряльщика на вышку из воды, не противоречит ни закону сохранения энергии, ни законам механики, ни вообще каким-либо законам, кроме второго закона термодинамики.

Второй закон термодинамики. Второй закон термодинамики указывает направление возможных энергетических превращений и тем самым выражает необратимость процессов в природе. Он был установлен путем непосредственного обобщения опытных фактов.

Есть несколько формулировок второго закона, которые, несмотря на внешнее различие, выражают, в сущности, одно и то же и поэтому равноценны.

Немецкий ученый Р. Клаузиус сформулировал этот закон так: **невозможно перевести тепло от более холодной системы к более горячей при отсутствии других одновременных изменений в обеих системах или в окружающих телах.**

Здесь констатируется опытный факт определенной направленности теплопередачи: теплота сама собой переходит всегда от горячих тел к холодным. Правда, в холодильных установках осуществляется теплопередача от холодного тела к более теплому, но эта передача связана с «другими изменениями в окружающих телах»: охлаждение достигается за счет работы.

Важность этого закона состоит в том, что из него можно вывести заключение о необратимости не только процесса теплопередачи, но и других процессов в природе. Если бы теплота в каких-либо случаях могла самопроизвольно передаваться от холодных тел к горячим, то это позволило бы сделать обратимыми и другие процессы. В частности, позволило бы создать двигатели, полностью превращающие внутреннюю энергию в механическую.

21. ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Запасы внутренней энергии в земной коре и океанах можно считать практически неограниченными. Но располагать запасами энергии еще недостаточно. Необходимо уметь за счет энергии приводить в движение станки на фабриках и заводах, средства транспорта, тракторы и другие машины, вращать роторы генераторов электрического тока и т. д. Человечеству нужны двигатели — устройства, способные совершать работу.

Необратимость процессов в природе налагает определенные ограничения на возможность использования внутренней энергии для совершения работы в тепловых двигателях.

Роль тепловых двигателей в развитии теплоэнергетики и транспорта. Большая часть двигателей на Земле — это тепловые двигатели, т. е. устройства, превращающие внутреннюю энергию топлива в механическую энергию.

Наибольшее значение имеет использование тепловых двигателей (в основном мощных паровых турбин) на тепловых электростанциях, где они приводят в движение роторы генераторов электрического тока. Более 80% всей электроэнергии в нашей стране вырабатывается на тепловых электростанциях.

Тепловые двигатели — паровые турбины — устанавливают также на всех атомных электростанциях. На этих станциях для получения пара высокой температуры используется энергия атомных ядер.

Далее, на всех основных видах современного транспорта преимущественно используются тепловые двигатели. На автомобильном транспорте применяют поршневые двигатели внутреннего сгорания с внешним образованием горючей смеси (карбюраторные двигатели) и двигатели с образованием горючей смеси непосредственно внутри цилиндров (дизели). Эти же двигатели устанавливаются на тракторах, незаменимых в сельском хозяйстве.

На железнодорожном транспорте до середины XX в. основным двигателем была паровая машина. Теперь же главным образом используют тепловозы с дизельными установками и электровозы. Но и электровозы в конечном счете получают энергию преимущественно от тепловых двигателей электростанций.

На водном транспорте используются как двигатели внутреннего сгорания, так и мощные паровые турбины для крупных судов.

В авиации на легких самолетах устанавливают поршневые двигатели, а на огромных лайнерах — турбореактивные и реактивные двигатели, которые также относятся к тепловым двигателям. Реактивные двигатели применяются и на космических ракетах.

Без тепловых двигателей современная цивилизация немыслима. Мы не имели бы в изобилии дешевую электроэнергию и были бы лишены всех видов скоростного транспорта.

Основное условие работы тепловых двигателей. Во всех тепловых двигателях топливо при сгорании повышает температуру рабочего тела на сотни или тысячи градусов по сравнению с окружающей средой. При этом повышается давление рабочего тела по сравнению с давлением окружающей среды, т. е. атмосферы, и тело совершает работу за счет своей внутренней энергии. Рабочим телом у всех тепловых двигателей является газ.

Ни один тепловой двигатель не может работать при одинаковой температуре его рабочего тела и окружающей среды. В состоянии теплового равновесия не происходит никаких макроскопических процессов; в частности, не может совершаться работа.

Тепловой двигатель совершает работу за счет внутренней энергии в процессе перехода теплоты от более горячих тел к более холодным. При этом совершаемая работа всегда меньше количества теплоты, получаемой двигателем от горячего тела (нагревателя). Часть теплоты передается более холодному телу (холодильнику).

Роль холодильника. Выясним, почему при работе теплового двигателя неизбежна передача части теплоты холодильнику.

При адиабатном расширении газа в цилиндре (рис. 45) работа совершается за счет убыли внутренней энергии без передачи теплоты холодильнику. Согласно формуле (4.14) $A' = -A = -\Delta U$. При изотермическом процессе вся передаваемая газу теплота оказывается равной работе: $Q = A'$.

Однако как в первом, так и во втором процессах работа совершается при однократном расширении газа до давления, равного внешнему (например, атмосферному давлению). Двигатель же должен работать длительное время. Это возможно лишь в том случае, когда все части двигателя (поршни, клапаны и т. д.) совершают движения, повторяющиеся через определенные промежутки времени. Двигатель должен периодически по прошествии одного рабочего цикла возвращаться в исходное состояние; или же в двигателе должен совершаться неизменный во времени (стационарный) процесс (например, непрерывное вращение турбины).

Чтобы возвратить газ в цилиндре в исходное состояние, его необходимо сжать. Для сжатия газа надо совершить над ним работу. Работа сжатия будет меньше работы, совершаемой самим газом при расширении, если газ сжимать при меньшей температуре, а значит, и при меньшем давлении, чем это происходило при расширении газа. Для этого необходимо до сжатия или в процессе сжатия охладить газ, передав некоторое количество теплоты холодильнику.

В используемых на практике двигателях совершивший работу (отработанный) газ (или пар) не охлаждают перед последующим сжатием, а выпускают из двигателя и следующий рабочий цикл начинают с новой порцией газа. Отработанный газ имеет более высокую температуру, чем окружающие тела, и передает им некоторое количество теплоты.

Для вращения паровой турбины на ее лопасти непрерывно подается горячий пар под большим давлением, который после совершения работы охлаждается и выводится из турбины. Остывая и конденсируясь, пар передает теплоту окружающим телам.

У паровой турбины или машины нагревателем является паровой котел, а холодильником — атмосфера или специальные устройства для охлаждения и конденсации отработанного пара — конденсаторы. В двигателях внутреннего сгорания повышение температуры происходит при сгорании топлива внутри двигателя и «нагревателем» являются сами раскаленные продукты сгорания топлива. Холодильником также служит атмосфера, куда выбрасываются отработанные газы.

Принципиальная схема теплового двигателя изображена на цветной вклейке *1*. Рабочее тело двигателя получает количество теплоты Q_1 от нагревателя, совершает работу A' и передает холодильнику количество теплоты $Q_2 < Q_1$.

Другая формулировка второго начала термодинамики. Невозможность полного превращения внутренней энергии в работу в тепловых двигателях, периодически возвращающихся в исходное состояние, обусловлена необратимостью процессов в природе и лежит в основе еще одной формулировки второго закона термодинамики.

Эта формулировка принадлежит английскому ученому У. Кельвину: **невозможно осуществить такой периодический процесс, единственным результатом которого было бы получение работы за счет теплоты, взятой от одного источника.**

Обе формулировки второго закона термодинамики взаимно обусловливают друг друга. Если бы теплота могла самопроизвольно переходить от холодильника к нагревателю, то внутренняя энергия могла бы быть полностью превращена в работу с помощью любого теплового двигателя.

22. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ (КПД) ТЕПЛОВОГО ДВИГАТЕЛЯ. ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ И ОХРАНА ПРИРОДЫ

КПД теплового двигателя. Согласно закону сохранения энергии работа, совершаемая двигателем, равна:

$$A' = |Q_1| - |Q_2|, \tag{4.16}$$

где Q_1 — теплота, полученная от нагревателя, а Q_2 — теплота, отданная холодильнику.

Коэффициентом полезного действия теплового двигателя называют отношение работы A', совершаемой двигателем, к количеству теплоты Q_1, полученному от нагревателя:

$$\eta = \frac{A'}{|Q_1|} = \frac{|Q_1| - |Q_2|}{|Q_1|} = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|}. \tag{4.17}$$

Так как у всех двигателей некоторое количество теплоты Q_2 передается холодильнику, то во всех случаях $\eta < 1$.

Максимальное значение КПД тепловых двигателей. Французский инженер и ученый Сади Карно (1796—1832) в труде «Размышление о движущей силе огня» (1824) поставил цель: выяснить, при каких условиях работа теплового двигателя будет наиболее эффективной, т. е. при каких условиях двигатель будет иметь максимальный КПД.

Карно придумал идеальную тепловую машину с идеальным газом в качестве рабочего тела. Он вычислил КПД этой машины, работающей с нагревателем температуры T_1 и холодильником температуры T_2:

$$\eta_{max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \qquad (4.18)$$

Главное значение этой формулы состоит в том, как доказал Карно, опираясь на второй закон термодинамики, что любая **реальная тепловая машина, работающая с нагревателем температуры T_1 и холодильником температуры T_2, не может иметь коэффициент полезного действия, превышающий КПД идеальной тепловой машины.**

Формула (4.18) дает теоретический предел для максимального значения КПД тепловых двигателей. Она показывает, что тепловой двигатель тем эффективнее, чем выше температура нагревателя и ниже температура холодильника. Лишь при температуре холодильника, равной абсолютному нулю, $\eta = 1$.

Но температура холодильника практически не может быть намного ниже температуры окружающего воздуха. Повышать температуру нагревателя можно. Однако любой материал (твердое тело) обладает ограниченной теплостойкостью, или жаропрочностью. При нагревании он постепенно утрачивает свои упругие свойства, а при достаточно высокой температуре плавится.

Сейчас основные усилия инженеров направлены на повышение КПД двигателей за счет уменьшения трения их частей, потерь топлива вследствие его неполного сгорания и т. д. Реальные возможности для повышения КПД здесь все еще остаются большими. Так, для паровой турбины начальные и конечные температуры пара примерно таковы: $T_1 = 800$ К и $T_2 = 300$ К. При этих температурах максимальное значение КПД равно:

$$\eta_{max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \approx 0{,}62; \quad \eta_{max} \approx 62\%.$$

Действительное же значение КПД из-за различного рода энергетических потерь равно: $\eta \approx 40\%$.

Повышение КПД тепловых двигателей, приближение его к максимально возможному — важнейшая техническая задача.

Тепловые двигатели и охрана природы. Повсеместное применение тепловых двигателей с целью получения удобной для использования энергии в наибольшей степени, по сравнению со

всеми другими видами производственных процессов, связано с воздействием на окружающую среду.

Согласно второму закону термодинамики производство электрической и механической энергии в принципе не может быть осуществлено без отвода в окружающую среду значительных количеств теплоты. Это не может не приводить к постепенному повышению средней температуры на Земле. Сейчас потребляемая мощность составляет около 10^{10} кВт. Когда эта мощность достигнет $3 \cdot 10^{12}$ кВт, то средняя температура повысится заметным образом (примерно на один градус). Дальнейшее повышение температуры может создать угрозу таяния ледников и катастрофического повышения уровня мирового океана.

Но этим далеко не исчерпываются негативные последствия применения тепловых двигателей. Топки тепловых электростанций, двигатели внутреннего сгорания автомобилей и т. д. непрерывно выбрасывают в атмосферу вредные для растений, животных и человека вещества: сернистые соединения (при сгорании каменного угля), оксиды азота, углеводороды, оксид углерода (CO) и др. Особую опасность в этом отношении представляют автомобили, число которых угрожающе растет, а очистка отработанных газов затруднена. На атомных электростанциях встает проблема захоронения опасных радиоактивных отходов.

Кроме того, применение паровых турбин на электростанциях требует больших площадей под пруды для охлаждения отработанного пара. С увеличением мощностей электростанций резко возрастает потребность в воде. В 1980 г. в нашей стране для этих целей требовалось около 200 км^3 воды, т. е. около 35% водоснабжения всех отраслей хозяйства.

Все это ставит ряд серьезных проблем перед обществом. Наряду с важнейшей задачей повышения КПД тепловых двигателей требуется проводить ряд мероприятий по охране окружающей среды. Необходимо повышать эффективность сооружений, препятствующих выбросу в атмосферу вредных веществ; добиваться более полного сгорания топлива в автомобильных двигателях. Уже сейчас не допускаются к эксплуатации автомобили с повышенным содержанием CO в отработанных газах. Обсуждается возможность создания электромобилей, способных конкурировать с обычными, и возможность применения горючего без вредных веществ в отработанных газах, например в двигателях, работающих на смеси водорода с кислородом.

Целесообразно для экономии площади и водных ресурсов сооружать целые комплексы электростанций, в первую очередь атомных, с замкнутым циклом водоснабжения.

Другое направление прилагаемых усилий — это увеличение эффективности использования энергии, борьба за ее экономию.

Решение перечисленных выше проблем жизненно важно для человечества. И эти проблемы с максимальным успехом могут

быть решены в социалистическом обществе с плановым развитием экономики в масштабах страны. Но организация охраны окружающей среды требует усилий в масштабе земного шара.

? **1. Какие процессы называются необратимыми? 2. Назовите наиболее типичные необратимые процессы. 3. Приведите примеры необратимых процессов, не упомянутых в тексте. 4. Сформулируйте второй закон термодинамики. 5. Если бы реки потекли вспять, означало бы это нарушение закона сохранения энергии? 6. Какое устройство называют тепловым двигателем? 7. Какова роль нагревателя, холодильника и рабочего тела теплового двигателя? 8. Почему в тепловых двигателях нельзя использовать в качестве источника энергии внутреннюю энергию океана? 9. Что называется коэффициентом полезного действия теплового двигателя? 10. Чему равно максимально возможное значение коэффициента полезного действия теплового двигателя?**

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

В задачах на материал этой главы используется первый закон термодинамики в форме $\Delta U = A + Q$ или $Q = \Delta U + A'$.

Для решения задач нужно уметь вычислять работу, пользуясь формулой (4.4), и количество теплоты по формулам (4.5), (4.6), (4.7), (4.8), (4.9). Надо иметь в виду, что величины A, Q, ΔU могут быть как положительными, так и отрицательными.

При решении многих задач надо знать выражение для внутренней энергии идеального одноатомного газа (4.1). Часто приходится пользоваться уравнением состояния идеального газа (3.4) для выражения одних макроскопических параметров через другие.

В большей части задач используется не общая форма первого закона термодинамики, а его различные частные формулировки, применимые к определенным процессам. Задачи на теплообмен в изолированной системе решаются с помощью уравнения теплового баланса (4.15).

При решении задач с использованием графиков надо помнить о геометрическом истолковании работы (§ 16).

Как и при решении задач на газовые законы, в задачах на материал этой главы надо четко выделять начальное состояние системы и характеризующие ее параметры, а также конечное состояние.

Нужно помнить формулу (4.18) для максимального значения КПД тепловых двигателей.

1. Аэростат объемом $V = 500$ м^3 наполнен гелием под давлением $p = 10^5$ Па. В результате солнечного нагрева температура газа в аэростате поднялась от $t_1 = 10$°С до $t_2 = 25$° С. На сколько увеличилась внутренняя энергия газа?

Решение. Гелий является одноатомным газом, поэтому его внутренняя энергия определяется формулой (4.1). При температу-

ре T_1 эта энергия равна $U_1=\frac{m}{M}\frac{3}{2}RT_1$, а при температуре T_2 — $U_2=\frac{m}{M}\frac{3}{2}RT_2$.

Согласно уравнению Менделеева—Клапейрона $pV=\frac{m}{M}RT_1$, очевидно, что $\frac{mR}{M}=\frac{pV}{T_1}$. Изменение энергии

$$\Delta U=U_2-U_1=\frac{m}{M}R\frac{3}{2}(T_2-T_1)=\frac{3}{2}pV\left(\frac{T_2}{T_1}-1\right);\quad \Delta U\approx 4\cdot 10^6\text{Дж}.$$

2. В цилиндре под тяжелым поршнем находится углекислый газ ($M=0{,}044$ кг/моль) массой $m=0{,}2$ кг. Газ нагревается на $\Delta T=88$ К. Какую работу он при этом совершает?

Решение. Газ расширяется при некотором постоянном давлении p, которое создается атмосферой и поршнем. В этом случае работа газа равна:

$$A'=p(V_2-V_1),$$

где V_1 и V_2 — начальный и конечный объемы газа. Используя уравнение состояния идеального газа $pV=\frac{m}{M}RT$, выразим произведения pV_2 и pV_1 через $\frac{m}{M}RT_1$ и $\frac{m}{M}RT_2$. Тогда

$$A'=\frac{m}{M}R(T_2-T_1);\quad A'\approx 3{,}32\ \text{Дж}.$$

3. Во время расширения газа в цилиндре с поперечным сечением $S=200$ см^2, вызванного нагреванием, газу было передано количество теплоты $Q=15\cdot 10^4$ Дж, причем давление газа оставалось постоянным и равным $p=2\cdot 10^7$ Па. На сколько изменилась внутренняя энергия газа, если поршень передвинулся на расстояние $\Delta h=30$ см?

Решение. Согласно первому закону термодинамики в форме (4.12)

$$Q=\Delta U+A',$$

где $A'=p\Delta V=pS\Delta h$ — работа, совершенная газом.

Отсюда

$$\Delta U=Q-pS\Delta h;\qquad \Delta U=30\ \text{кДж}.$$

4. В калориметр, где находилось $m_1=0{,}2$ кг воды при температуре $t_1=20°$C, влили $m_2=0{,}3$ кг воды, температура которой $t_2=80°$C. После этого в калориметре установилась температура $t=50°$C. Какова теплоемкость калориметра? (Теплоемкостью тела называют произведение его массы на удельную теплоемкость: $C=cm$.)

Р е ш е н и е. Согласно уравнению теплового баланса сумма количеств теплоты, которыми обмениваются тела в калориметре, равна нулю. Вода температуры t_2 передает количество теплоты $cm_2(t-t_2)$, вода температуры t_1 получает количество теплоты $cm_1(t-t_1)$; калориметр получает количество теплоты $C(t-t_1)$, так как его начальная температура была равна температуре воды t_1.

Следовательно,

$$cm_2(t-t_2)+cm_1(t-t_1)+C(t-t_1)=0.$$

Отсюда

$$C=\frac{cm_1(t_1-t)+cm_2(t_2-t)}{t-t_1};\quad C\approx 420\frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$

5. В отработанном паре, температура которого $t_1=100°C$, капельки воды составляют 90% его массы. Чтобы охладить такой пар, его смешивают с равным по массе количеством холодной воды ($t_2=10°C$). Какую температуру t будет иметь образовавшаяся вода?

Р е ш е н и е. Обозначим массу холодной воды m. Тогда масса пара будет $0{,}1\ m$, а масса капелек воды $0{,}9\ m$. Количество теплоты, отданное при конденсации пара и остывании образовавшейся воды, отрицательно:

$$Q_1=-0{,}1\ rm+0{,}1\ cm(t-t_1).$$

Количество теплоты, отданное остывающими капельками, также отрицательно:

$$Q_2=0{,}9\ cm(t-t_1),\qquad \text{а } t<t_1.$$

Холодная вода получает количество теплоты $Q_3=cm(t-t_2)$. Составим уравнение теплового баланса:

$$Q_1+Q_2+Q_3=0;$$

$$-0{,}1rm+0{,}1cm(t-t_1)+0{,}9cm(t-t_1)+cm(t-t_2)=0.$$

Отсюда

$$t=\frac{0{,}1r+c(t_1+t_2)}{2c};\quad t\approx 82°C.$$

Упр 4

1. Как изменится внутренняя энергия одноатомного идеального газа, если его давление увеличивается в 3 раза, а объем уменьшается в 2 раза?

2. Газ, находящийся под давлением $p=10^5$ Па, изобарно расширился, совершив работу $A=25$ Дж. На сколько увеличился объем газа?

3. Термодинамической системе передано количество теплоты 200 Дж. Как изменялась внутренняя энергия системы, если при этом она совершила работу 400 Дж?

4. Стержень отбойного молотка приводится в движение сжатым воздухом. Масса воздуха в цилиндре за время хода поршня меняется от 0,1 до 0,5 г. Считая давление воздуха в цилиндре и температуру (27°C)

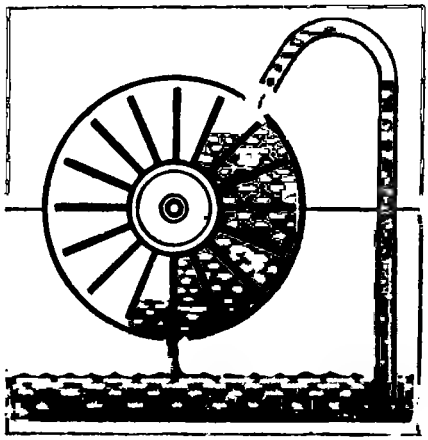


Рис. 50

постоянными, определить работу газа за один ход поршня. Молярная масса $M = 0{,}029$ кг/моль.

5. На одинаковые газовые горелки поставили два одинаковых плотно закупоренных сосуда вместимостью по 1 л. В одном сосуде находится вода, а в другом — воздух. Какой сосуд быстрее нагреется до 50°С? Почему?

6. Предложен следующий проект вечного двигателя (рис. 50). Закрытый сосуд разделен на две половины герметической перегородкой, сквозь которую пропущены трубка и водяная турбина в кожухе с двумя отверстиями. Давление воздуха в нижней части больше, чем в верхней. Вода поднимается по трубке и наполняет открытую камеру. В нижней части очередная порция воды выливается из камеры турбины, подошедшей к отверстию кожуха. Почему данная машина не будет работать вечно?

7. Положительна или отрицательна работа газа в процессах 1—2, 2—3 и 3—1 на рисунке 38? Получает газ или отдает теплоту в каждом из этих процессов?

8. Вычислите увеличение внутренней энергии 2 кг водорода при изобарном его нагревании на 10 К. Удельная теплоемкость водорода при постоянном давлении равна 14 кДж/(кг·К).

9. Какое количество теплоты необходимо для изохорного нагревания 4 кг гелия на 100 К?

10. При изотермическом расширении газом совершена работа 20 Дж. Какое количество теплоты сообщено газу?

11. Температура газа с массой m и молярной массой M повышается на величину ΔT один раз при постоянном давлении p, а другой раз при постоянном объеме V. На сколько отличаются количества теплоты, сообщенной газу в первом и во втором случаях?

12. В цилиндре компрессора сжимают 4 моль идеального одноатомного газа. Определить, на сколько поднялась температура газа за один ход поршня, если при этом была совершена работа 500 Дж. Процесс считать адиабатным.

13. В калориметр, содержащий 0,25 кг воды при температуре 25°С, впускают 0,01 кг водяного пара при температуре 100°С. Какая температура установится в калориметре, если его теплоемкость 1000 Дж/К?

14. Чтобы охладить стакан воды массой 0,2 кг, взятой при 23°С, до 8°С, в воду бросают мелкие кусочки льда, имеющие температуру −3°С. Какова масса льда, необходимая для этого?

15. В калориметре находится 0,4 кг воды при температуре 10°С. В воду положили 0,6 кг льда при температуре −40°С. Какая температура установится в калориметре, если его теплоемкость ничтожно мала?

16. Какой должна быть температура нагревателя для того, чтобы в принципе стало возможным достижение значения КПД тепловой машины 80%, если температура холодильника 27°С?

17. В процессе работы тепловой машины за некоторое время рабочим

телом было получено от нагревателя $Q_1=1{,}5\cdot10^6$ Дж теплоты, передано холодильнику $Q_2=-1{,}2\cdot10^6$ Дж теплоты. Вычислить КПД машины и сравнить его с максимально возможным КПД, если температура нагревателя 250°С, холодильника 30°С.

КРАТКИЕ ИТОГИ ГЛАВЫ IV

Макроскопические тела обладают внутренней энергией, равной сумме кинетических энергий хаотического движения всех молекул тела и потенциальных энергий взаимодействия всех молекул друг с другом. Внутренняя энергия является однозначной функцией термодинамических параметров: температуры и объема. В случае идеального одноатомного газа внутренняя энергия зависит только от температуры:

$$U=\frac{m}{M}\frac{3}{2}RT.$$

Согласно первому закону термодинамики изменение внутренней энергии системы при переходе ее из одного состояния в другое равно сумме работы внешних сил и количества теплоты, переданного системе:

$$\Delta U=A+Q.$$

Работа, совершаемая над системой, в термодинамике равна: $A=-p\Delta V$, где p — давление, а ΔV — изменение объема. Сама система при этом совершает работу $A'=-A=p\Delta V$. При нагревании и охлаждении количество теплоты равно: $Q=mc\Delta T$, где c — удельная теплоемкость, а ΔT — изменение температуры. Кроме того, теплота поглощается при парообразовании и плавлении и выделяется при конденсации и кристаллизации (формулы 4.6, 4.7, 4.8 и 4.9).

Работа и количество теплоты — характеристики процессов, при которых меняется энергия.

При изохорном процессе ($V=$const) работа равна нулю и $\Delta U=Q$.

При изотермическом процессе ($T=$const) внутренняя энергия идеального газа не меняется и $Q=A'$.

При изобарном процессе ($p=$const) передаваемая системе теплота идет на изменение внутренней энергии системы и совершение работы $Q=\Delta U+A'$.

При адиабатном процессе (в теплоизолированной системе) $Q=0$, $\Delta U=A$.

При обмене теплотой в изолированной системе без совершения работы выполняется уравнение теплового баланса:

$$Q_1+Q_2+Q_3+\ldots=0,$$

где Q_1, Q_2, Q_3 — количества теплоты, полученные или отданные телами.

Протекающие в природе процессы с макроскопическими телами необратимы. Типичные необратимые процессы таковы: теплота самопроизвольно переходит от горячего тела к холодному, но не наоборот; механическая энергия самопроизвольно переходит во внутреннюю.

Путем обобщения опытных фактов, касающихся необратимости процессов, был сформулирован второй закон термодинамики. Одна из возможных формулировок второго закона имеет прямое отношение к тепловым двигателям — устройствам, превращающим внутреннюю энергию топлива в механическую энергию: невозможно осуществить такой периодический процесс, единственным результатом которого было бы получение работы за счет теплоты, взятой от одного источника. Из второго закона термодинамики вытекает, что тепловые двигатели могут совершать работу только в процессе передачи теплоты от нагревателя к холодильнику. Максимально возможное значение коэффициента полезного действия теплового двигателя

$$\eta=\frac{T_1-T_2}{T_1},$$

где T_1 — температура нагревателя, T_2 — температура холодильника.

Повышение КПД тепловых двигателей, приближение его к максимально возможному — важнейшая техническая задача.

Глава V.
ВЗАИМНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

23. НАСЫЩЕННЫЙ ПАР

Молекулярно-кинетическая теория позволяет не только понять, почему вещество может находиться в газообразном, жидком и твердом состояниях, но и объяснить процесс перехода вещества из одного состояния в другое.

Испарение и конденсация. Количество воды или любой другой жидкости в открытом сосуде постепенно уменьшается. Происходит *испарение* жидкости, механизм которого был описан в курсе физики VII класса. При хаотическом движении некоторые молекулы приобретают столь большую кинетическую энергию, что покидают жидкость, преодолевая силы притяжения со стороны остальных молекул.

Одновременно с испарением происходит обратный процесс — переход части хаотически движущихся молекул пара в жидкость. Этот процесс называют *конденсацией*. Если сосуд открытый, то покинувшие жидкость молекулы могут и не возвратиться в жид-

кость. В этих случаях испарение не компенсируется конденсацией и количество жидкости уменьшается. Когда поток воздуха над сосудом уносит образовавшиеся пары, жидкость испаряется быстрее, так как у молекулы пара уменьшается возможность вновь вернуться в жидкость.

Насыщенный пар. Если сосуд с жидкостью плотно закрыть, то убыль ее вскоре прекратится. При неизменной температуре система «жидкость — пар» придет в состояние теплового равновесия и будет находиться в нем сколь угодно долго.

В первый момент, после того как жидкость нальют в сосуд и закроют его, она будет испаряться и плотность пара над жидкостью — увеличиваться. Однако одновременно с этим будет расти число молекул, возвращающихся в жидкость. Чем больше плотность пара, тем большее число молекул пара возвращается в жидкость. В результате в закрытом сосуде при постоянной температуре в конце концов установится динамическое (подвижное) равновесие между жидкостью и паром. Число молекул, покидающих поверхность жидкости, будет равно числу молекул пара, возвращающихся за то же время в жидкость. Одновременно с процессом испарения происходит конденсация, и оба процесса в среднем компенсируют друг друга.

Пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью, называют насыщенным паром. Это название подчеркивает, что в данном объеме при данной температуре не может находиться большее количество пара.

Если воздух из сосуда с жидкостью предварительно откачан, то над поверхностью жидкости будет находиться только насыщенный пар.

Давление насыщенного пара. Что будет происходить с насыщенным паром, если уменьшать занимаемый им объем, например сжимать пар, находящийся в равновесии с жидкостью в цилиндре под поршнем, поддерживая температуру содержимого цилиндра постоянной?

При сжатии пара равновесие начнет нарушаться. Плотность пара в первый момент немного увеличивается, и из газа в жидкость начинает переходить большее число молекул, чем из жидкости в газ. Это продолжается до тех пор, пока вновь не установится равновесие и плотность, а значит, и концентрация молекул не примет прежнее значение. *Концентрация молекул насыщенного пара,* следовательно, *не зависит от объема при постоянной температуре.*

Так как давление пропорционально концентрации в соответствии с формулой $p = nkT$, то из независимости концентрации (или плотности) насыщенных паров от объема следует независимость давления насыщенного пара от занимаемого им объема.

Независимое от объема давление пара p_0, при котором жидкость находится в равновесии со своим паром, называют давлением насыщенного пара.

При сжатии насыщенного пара все бо́льшая часть его переходит в жидкое состояние. Жидкость данной массы занимает меньший объем, чем пар той же массы. В результате объем пара при неизменной его плотности уменьшается.

Мы много раз употребляли слова «газ» и «пар». Никакой принципиальной разницы между газом и паром нет, и эти слова в общем-то равноправны. Но мы привыкли к определенному, относительно небольшому интервалу температуры окружающей среды. Слово «газ» обычно применяют к тем веществам, давление насыщенного пара которых при обычных температурах выше атмосферного (например, углекислый газ). Напротив, о паре говорят тогда, когда при комнатной температуре давление насыщенного пара меньше атмосферного и вещество более устойчиво в жидком состоянии (например, водяной пар).

Независимость давления насыщенного пара от объема установлена на многочисленных экспериментах по изотермическому сжатию пара, находящегося в равновесии со своей жидкостью. Пусть вещество при больших объемах находится в газообразном состоянии. По мере изотермического сжатия плотность и давление его увеличиваются (участок изотермы AB на рисунке 51). При достижении давления p_0 начинается конденсация пара. В дальнейшем при сжатии насыщенного пара давление не меняется до тех пор, пока весь пар не обратится в жидкость (прямая BC на рисунке 51). После этого давление при сжатии начинает резко возрастать (отрезок кривой CD), так как жидкости мало сжимаемы.

Изображенная на рисунке 51 кривая носит название изотермы реального газа.

24. ЗАВИСИМОСТЬ ДАВЛЕНИЯ НАСЫЩЕННОГО ПАРА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ. КИПЕНИЕ. КРИТИЧЕСКАЯ ТЕМПЕРАТУРА

Зависимость давления насыщенного пара от температуры. Состояние насыщенного пара приближенно описывается уравнением состояния идеального газа (3.4), а его давление приближенно определяется формулой

$$p_0 = nkT. \qquad (5.1)$$

Рис. 51

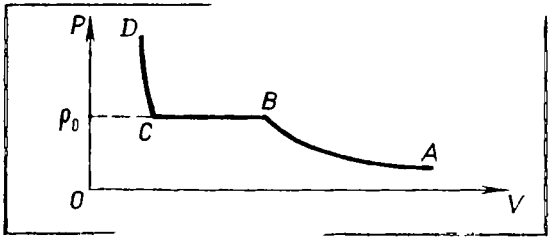
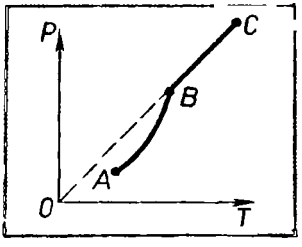


Рис. 52



С ростом температуры давление растет. Так как *давление насыщенного пара не зависит от объема, то, следовательно, оно зависит только от температуры.*

Однако эта зависимость $p_0(T)$, найденная экспериментально, не является прямо пропорциональной, как у идеального газа при постоянном объеме. С увеличением температуры давление насыщенного пара растет быстрее, чем давление идеального газа (рис. 52, участок кривой AB).

Это происходит по следующей причине. При нагревании жидкости с паром в закрытом сосуде часть жидкости превращается в пар. В результате согласно формуле (5.1) *давление пара растет не только вследствие повышения температуры, но и вследствие увеличения концентрации молекул (плотности) пара.* Основное различие в поведении идеального газа и насыщенного пара состоит в том, что при изменении температуры пара в закрытом сосуде (или при изменении объема при постоянной температуре) меняется масса пара. Жидкость частично превращается в пар или, напротив, пар частично конденсируется. С идеальным газом ничего подобного не происходит.

Когда вся жидкость испарится, пар при дальнейшем нагревании перестанет быть насыщенным и его давление при постоянном объеме будет возрастать прямо пропорционально абсолютной температуре (участок BC на рисунке 52).

Кипение. Зависимость давления насыщенного пара от температуры объясняет, почему температура кипения жидкости зависит от давления. *При кипении по всему объему жидкости образуются быстро растущие пузырьки пара, которые всплывают на поверхность.* Очевидно, что пузырек пара может расти, когда давление насыщенного пара внутри него немного превосходит давление в жидкости, которое складывается из давления воздуха на поверхность жидкости (внешнее давление) и гидростатического давления столба жидкости.

Кипение начинается при температуре, при которой давление насыщенного пара в пузырьках сравнивается с давлением в жидкости.

Чем больше внешнее давление, тем выше температура кипения. Так, при давлении в паровом котле, достигающем $1{,}6 \cdot 10^6$ Па, вода не кипит и при температуре 200°С. В медицинских учреждениях кипение воды в герметически закрытых сосудах — автоклавах (рис. 53) — также происходит при повышенном давлении. Поэтому температура кипения значительно выше 100°С. Автоклавы применяют для стерилизации хирургических инструментов, перевязочного материала и т. д.

Наоборот, уменьшая давление, мы тем самым понижаем температуру кипения. Откачивая насосом воздух и пары воды из колбы, можно заставить воду кипеть при комнатной температуре (рис. 54). При подъеме в горы атмосферное давление уменьшается. Поэтому уменьшается температура кипения. На высоте

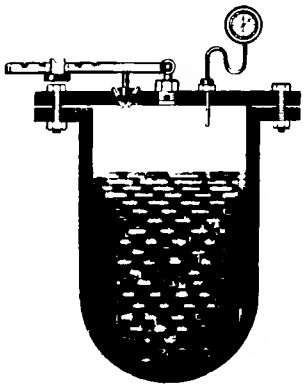


Рис. 53

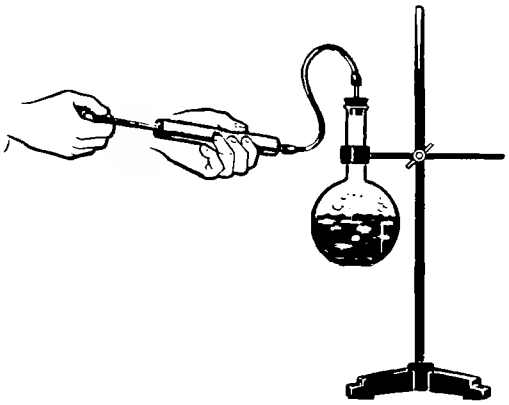


Рис. 54

7134 м (пик Ленина на Памире) давление приближенно равно $4 \cdot 10^4$ Па (300 мм рт. ст.). Температура кипения воды там составляет примерно 70°С. Сварить, например, мясо при этих условиях невозможно.

Различие температур кипения жидкостей определяется различием в давлении их насыщенных паров. Чем выше давление насыщенного пара, тем ниже температура кипения соответствующей жидкости, так как при меньших температурах давление насыщенного пара становится равным атмосферному. Например, при 100°С давление насыщенных паров воды равно 101325 Па (760 мм рт. ст.), а паров ртути — всего лишь 117 Па (0,88 мм рт. ст.). Кипит ртуть при 357°С при нормальном давлении.

Критическая температура. При увеличении температуры одновременно с увеличением давления насыщенного пара растет также его плотность. Плотность жидкости, находящейся в равновесии со своим паром, наоборот, уменьшается вследствие расширения жидкости при нагревании. Если на одном рисунке начертить кривые зависимости плотности жидкости и ее пара от температуры, то для жидкости кривая пойдет вниз, а для пара — вверх (рис. 55).

Рис. 55

При некоторой температуре, называемой критической, обе кривые сливаются, т. е. плотность жидкости становится равной плотности пара.

Критической называется температура, при которой исчезают различия в физических свойствах между жидкостью и ее насыщенным паром.

При критической температуре плотность (и давление) насыщенного пара становится максимальной, а плотность жидкости, находящейся в равновесии с паром,— минимальной. Удельная теплота парообразования уменьшается с ростом температуры и при критической температуре становится равной нулю.

Каждое вещество характеризуется своей критической температурой. Например, критическая температура воды $\approx 375°C$, а жидкого оксида углерода (IV) $CO_2 \approx 31°C$.

25. ВЛАЖНОСТЬ ВОЗДУХА

Водяной пар в атмосфере. Водяной пар в воздухе, несмотря на огромные поверхности океанов, морей, озер и рек, не является насыщенным. Перемещение воздушных масс приводит к тому, что в одних местах нашей планеты в данный момент испарение воды преобладает над конденсацией, а в других, наоборот, преобладает конденсация. Но в воздухе практически всегда имеется некоторое количество водяного пара.

Содержание водяного пара в воздухе — его влажность — характеризуется рядом величин.

Парциальное давление водяного пара. Атмосферный воздух представляет собой смесь различных газов и водяного пара. Каждый из газов вносит свой вклад в суммарное давление, производимое воздухом на находящиеся в нем тела. **Давление, которое производил бы водяной пар, если бы все остальные газы отсутствовали, называют парциальным давлением водяного пара.** Парциальное давление водяного пара принимают за один из показателей влажности воздуха. Его выражают в единицах давления — паскалях — или миллиметрах ртутного столба.

Относительная влажность. По парциальному давлению водяного пара еще нельзя судить о том, насколько водяной пар в данных условиях далек от насыщения. А именно от этого зависит интенсивность испарения воды (или ее конденсация) и, следовательно, потеря влаги живыми организмами. Вот почему вводят величину, показывающую, насколько водяной пар при данной температуре далек от насыщения,— относительную влажность.

Относительной влажностью воздуха φ называют отношение парциального давления p водяного пара, содержащегося в воздухе при данной температуре, к давлению p_0 насыщенного пара при той же температуре, выраженное в процентах:

$$\varphi = \frac{p}{p_0} 100\%. \qquad (5.2)$$

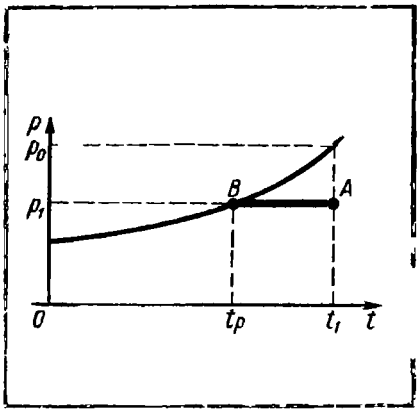


Рис. 56

Точка росы. Охлаждение ненасыщенного пара при постоянном давлении рано или поздно превратит его в насыщенный пар. В этом можно убедиться, если посмотреть на график зависимости давления насыщенного водяного пара от температуры (рис. 56).

Пусть при температуре t_1 парциальное давление водяного пара равно p_1. Состояние пара изобразится при этом точкой *A*. При охлаждении до температуры t_p при $p_1 = \text{const}$ пар станет насыщенным и его состояние изобразится точкой *B*. *Температуру t_p, при которой водяной пар становится насыщенным, называют точкой росы.*

При охлаждении воздуха до точки росы начинается конденсация паров: появляется туман, выпадает роса.

Точка росы характеризует влажность воздуха, так как она позволяет определить парциальное давление водяного пара и относительную влажность. В самом деле, если точка росы известна, то тем самым известно парциальное давление водяного пара p_1. Его можно найти с помощью таблицы, в которой приведены значения давления насыщенного пара при различных температурах (см. таблицу на форзаце). Давление насыщенного пара p_0, соответствующее температуре t_1, также определяется с помощью таблицы. Зная p_1 и p_0, находим относительную влажность:

$$\varphi = \frac{p_1}{p_0} 100\%.$$

Гигрометры[1]. Влажность воздуха измеряют с помощью особых приборов: гигрометров и психрометров[2].

Конденсационный гигрометр позволяет непосредственно определять точку росы. Простейший прибор этого типа представляет собой металлическую коробку *K*, передняя стенка *C* которой хорошо отполирована (рис. 57). Внутрь коробки наливают легко испаряющуюся жидкость — эфир — и вставляют термометр. Пропуская через коробку воздух с помощью резиновой груши *Г*, вызывают сильное испарение эфира и быстрое охлаждение коробки. По термометру замечают температуру, при которой появляются капельки росы на полированной поверхности стенки *C*. Давление в области, прилегающей к стенке, можно считать постоянным, так как эта область сообщается с атмосферой и понижение

[1] От греческого слова «гигрос» — влажный.
[2] От греческого слова «психрос» — холодный.

давления за счет охлаждения компенсируется увеличением концентрации пара. Появление росы указывает, что водяной пар стал насыщенным. Зная температуру воздуха и точку росы, можно найти парциальное давление водяного пара и относительную влажность с помощью таблицы зависимости давления насыщенного пара от температуры.

Другой гигрометр, волосной, основан на свойстве обезжиренного человеческого волоса удлиняться при увеличении относительной влажности.

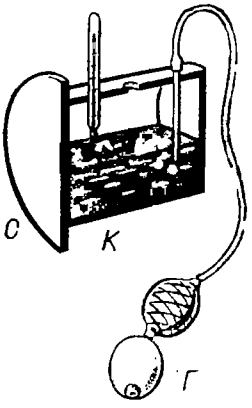


Рис. 57

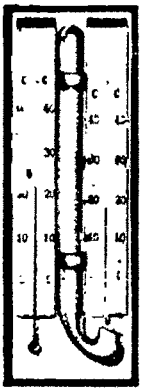


Рис. 58

Психрометр. Психрометр состоит из двух термометров (рис. 58). Резервуар одного из них остается сухим, и термометр показывает температуру воздуха. Резервуар другого окружен полоской ткани, конец которой опущен в воду. Вода испаряется, и благодаря этому термометр охлаждается. Чем больше относительная влажность, тем менее интенсивно идет испарение и тем более высокую температуру показывает термометр, окруженный полоской влажной ткани. При относительной влажности, равной 100%, вода вообще не будет испаряться и показания обоих термометров будут одинаковы. По разности температур обоих термометров с помощью специальных таблиц можно определить влажность воздуха. Психрометр позволяет определять влажность с большей точностью, чем гигрометр.

Значение влажности. От влажности воздуха зависит интенсивность испарения влаги с поверхности кожи человека. А испарение влаги имеет большое значение для поддержания температуры тела постоянной. В космических кораблях наряду с температурой и давлением воздуха поддерживается также наиболее благоприятная для человека относительная влажность (40–60%).

Большое значение имеет знание влажности в метеорологии для предсказания погоды. Хотя количество водяного пара в атмосфере сравнительно невелико (около 1%), роль его в атмосферных явлениях значительна. Конденсация водяного пара приводит к образованию облаков и последующему выпадению осадков. При этом выделяется большое количество теплоты. Испарение воды сопровождается, наоборот, поглощением теплоты.

В ткацком, кондитерском, табачном и других производствах для нормального течения процесса необходима определенная влажность. Хранение произведений искусства и книг требует поддержания влажности воздуха на необходимом уровне. Поэтому в музеях на стенах вы можете видеть психрометры.

? **1.** Что называют насыщенным паром? **2.** Почему давление насыщенного пара не зависит от объема? **3.** Почему давление насыщенного пара увеличивается с ростом температуры быстрее, чем давление идеального газа? **4.** Почему температура кипения возрастает с увеличением давления? **5.** Что называют критической температурой? **6.** Дайте определение относительной влажности воздуха. **7.** Как определить относительную влажность по известной точке росы?

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

При решении задач надо иметь в виду, что давление и плотность насыщенного пара не зависят от объема, а зависят только от температуры.

Во всех задачах сообщается давление насыщенного пара при заданной в условии задачи температуре.

Уравнение состояния идеального газа вдали от критической температуры приближенно применимо для описания насыщенного пара. Но при сжатии или нагревании насыщенного пара его масса не остается постоянной.

1. Закрытый сосуд объемом $V_1=0{,}5$ м^3 содержит $m=0{,}5$ кг воды. Сосуд нагрели до температуры $t=147^\circ$ С. На сколько следует изменить объем сосуда, чтобы в нем содержался только насыщенный пар? Давление насыщенного пара при температуре $t=147^\circ$С равно $p_0=4{,}7\cdot10^5$ Па.

Решение. Насыщенный пар при давлении p_0 занимает объем, равный

$$V=\frac{mRT}{p_0M}; \qquad V=0{,}2 \text{ м}^3,$$

где $M=0{,}018$ кг/моль — молярная масса воды. Объем сосуда $V_1>V$, и пар не является насыщенным. Для того чтобы пар стал насыщенным, объем сосуда следует уменьшить на

$$\Delta V=V_1-V=V_1-\frac{mRT}{p_0M}; \qquad \Delta V=0{,}3 \text{ м}^3.$$

2. Относительная влажность воздуха в закрытом сосуде при температуре $t_1=5^\circ$С равна $\varphi_1=84\%$, а при температуре $t_2=22^\circ$С равна $\varphi_2=30\%$. Во сколько раз давление насыщенных паров воды при температуре t_2 больше, чем при температуре t_1?

Решение. Давление водяного пара в сосуде при $T_1=278$ К равно: $p_1=\varphi_1p_{01}$, где p_{01} — давление насыщенного пара при температуре T_1. Аналогично при температуре $T_2=295$ К $p_2=\varphi_2p_{02}$. Поскольку объем постоянен, по закону Шарля

$$\frac{p_1}{p_2}=\frac{T_1}{T_2}.$$

Отсюда

$$\frac{p_{02}}{p_{01}} = \frac{\varphi_1 T_2}{\varphi_2 T_1} \approx 3.$$

Упр 5

1. В обоих коленах запаянной U-образной трубки вода стоит на разных уровнях. Можно ли сказать, что, кроме насыщенного водяного пара, над водой имеется воздух? Почему?

2. Как можно заставить воду закипеть, охлаждая сосуд, в котором она находится?

3. Как будет меняться температура кипения и удельная теплота парообразования воды, если сосуд с водой опускать в глубокую шахту?

4. Чему равна плотность пара в пузырях, поднимающихся к поверхности воды, кипящей при атмосферном давлении?

5. На улице моросит холодный осенний дождь. В комнате развешано выстиранное белье. Высохнет ли белье быстрее, если открыть форточку?

6. Всасывающий насос поднимает холодную воду на высоту 10,3 м. На какую высоту он поднимет воду, кипящую при температуре 100°С, если поршень насоса перемещается очень медленно?

7. Конденсация влаги из воздуха, имеющего температуру 20°С, началась при охлаждении его до температуры 11°С. Найти относительную влажность воздуха. Давление насыщенного пара при температуре 20°С равно $p_{01} = 17{,}54$ мм рт. ст., а при температуре 11°С $p_{02} = 9{,}84$ мм рт. ст.

8. В комнате объемом $V = 120$ м^3 при температуре $t = 15$°С относительная влажность $\varphi = 60\%$. Определите массу водяных паров в воздухе комнаты. Давление насыщенных паров при $t = 15$°С равно $p_0 = 12{,}8$ мм рт. ст.

9. При температуре $t = 20$°С относительная влажность в комнате $\varphi_1 = 20\%$. Какую массу воды нужно испарить для увеличения влажности до $\varphi_2 = 50\%$, если объем комнаты $V = 40$ м^3? Плотность насыщенных паров воды при температуре $t = 20$°С равна $\rho_0 = 1{,}73 \cdot 10^{-2}$ кг/м^3.

КРАТКИЕ ИТОГИ ГЛАВЫ V

Между жидкостью и паром над ней может существовать динамическое равновесие, при котором число молекул, покидающих жидкость за некоторое время, равно числу молекул, возвращающихся из пара в жидкость за то же время. Пар, находящийся в равновесии со своей жидкостью, называют насыщенным паром. Давление насыщенного пара не зависит от объема и определяется только температурой.

Жидкость кипит при температуре, при которой давление насыщенного пара в пузырьках сравнивается с давлением в жидкости.

С увеличением температуры плотность насыщенного пара растет, а плотность жидкости уменьшается. При температуре, называемой критической, исчезают различия в физических свойствах между жидкостью и ее насыщенным паром. Их плотности становятся одинаковыми.

Атмосферный воздух представляет собой смесь различных газов и водяного пара. Содержание водяного пара в воздухе — влажность воздуха — характеризуют рядом величин. Давление,

которое производил бы водяной пар, если бы все остальные газы отсутствовали, называют парциальным давлением водяного пара.

Относительной влажностью воздуха называют выраженное в процентах отношение парциального давления водяного пара, содержащегося в воздухе при данной температуре, к давлению насыщенного пара при той же температуре.

Большое значение имеет знание влажности в метеорологии для предсказания погоды.

Глава VI.
ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

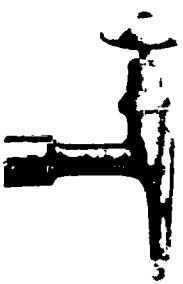
26. ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ

В окружающем нас мире наряду с тяготением, упругостью и трением действует еще одна сила, на которую мы обычно не обращаем внимания. Эта сила действует вдоль касательной к поверхностям всех жидкостей и носит название *силы поверхностного натяжения*. Она сравнительно невелика, но играет немаловажную роль в природе.

Действие сил поверхностного натяжения. Проще всего уловить характер сил поверхностного натяжения, наблюдая образование капли у неплотно закрытого крана. Всмотритесь внимательно, как постепенно растет капля, образуется сужение — шейка — и капля отрывается (рис. 59) Не нужно много фантазии, чтобы представить себе, что вода как бы заключена в эластичный мешочек и этот мешочек разрывается, когда его прочность становится недостаточной для удержания большой массы воды.

В действительности, конечно, ничего, кроме воды, в капле нет, но сам поверхностный слой воды ведет себя, как растянутая эластичная пленка. Такое же впечатление производит пленка мыльного пузыря. Она похожа на тонкую растянутую резину детского шарика.

Рис 59



Осторожно положите швейную иглу на поверхность воды. Поверхностная пленка прогнется и не даст игле утонуть. По этой же причине легкие насекомые — водомерки — могут быстро скользить по поверхности воды, как конькобежцы по льду (см. цветную вклейку 2).

Прогиб пленки не позволяет выливаться воде, осторожно налитой в достаточно частое решето. Ткань — это то же решето, образован-

ное переплетением нитей. Поверхностное натяжение сильно затрудняет просачивание воды сквозь нее, и поэтому ткань не промокает мгновенно.

В своем стремлении сократиться поверхностная пленка придавала бы жидкости сферическую форму, если бы сила тяжести не прижимала жидкость ко дну сосуда или другой твердой поверхности. Чем меньше капелька, тем бóльшую роль играют поверхностные силы по сравнению с объемными (тяготением). Поэтому маленькие капельки росы близки по форме к шару (см. цветную вклейку 2). При свободном падении возникает состояние невесомости, и поэтому дождевые капли почти точно шарообразны.

В космическом корабле, находящемся в состоянии невесомости, шарообразную форму принимают не только отдельные капли, но и жидкости большой массы.

Происхождение сил поверхностного натяжения. Наглядно появление сил поверхностного натяжения можно объяснить следующим образом. Если большая группа индивидуумов обладает свойством притягивать друг друга или индивидуумы по своему желанию устремляются друг к другу, то результат будет один: они соберутся в ком, подобный пчелиному рою. Каждый индивидуум «стремится» внутрь этого кома, и поверхность кома сокращается, приближаясь к сфере.

Молекулы воды или другой жидкости, притягиваясь друг к другу, стремятся сблизиться. Каждая молекула на поверхности притягивается остальными молекулами, находящимися внутри жидкости, и поэтому имеет тенденцию к погружению вглубь. Так как жидкость текуча из-за перескоков молекул из одного «оседлого» положения в другое, то она принимает такую форму, при которой число молекул на поверхности минимально. А минимальную площадь поверхности при данном объеме имеет шар. Площадь поверхности жидкости сокращается, и воспринимается это как поверхностное натяжение.

Здесь обнаруживается, что происхождение поверхностных сил совсем иное, чем упругих сил растянутой резиновой пленки. При сокращении резины упругая сила ослабевает, а силы поверхностного натяжения никак не меняются по мере сокращения площади поверхности пленки, так как плотность жидкости, а следовательно, и среднее расстояние между молекулами на поверхности не меняются.

27. СИЛА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ

Измерение силы поверхностного натяжения. П-образную проволочку со стороной AB длиной l подвесим к динамометру (рис. 60). Действующая на проволочку сила тяжести уравновесится направленной вверх силой упругости $\vec{F}_{\text{у}}$: $\vec{F}_{\text{у}} = -m\vec{g}$. За-

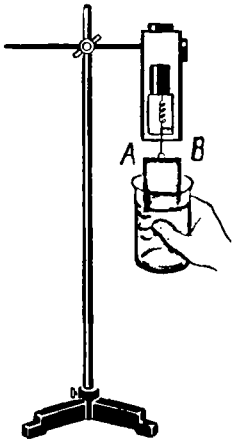


Рис. 60

тем подставим под проволочку сосуд с мыльным раствором так, чтобы сторона AB проволочки погрузилась в раствор. При медленном опускании сосуда образуется мыльная пленка и пружина динамометра растянется на бо́льшую величину; сила упругости достигает значения $\vec{F}_1$. Это означает, что на сторону проволочки AB действует со стороны мыльной пленки сила, направленная вниз. **Силой поверхностного натяжения называют силу, которая действует вдоль поверхности жидкости перпендикулярно к линии, ограничивающей эту поверхность, и стремится сократить ее до минимума.**

Зная цену деления динамометра, эту силу нетрудно определить. На проволочку со стороны пленки действует сила $2\vec{F}$, где $\vec{F}$ — сила поверхностного натяжения со стороны одной из двух поверхностей пленки (рис. 61). При равновесии сил

$$\vec{F}_1 + m\vec{g} + 2\vec{F} = 0,$$

или (для модулей сил)

$$F_1 - mg - 2F = 0.$$

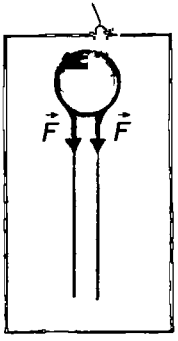


Рис. 61

Отсюда, учитывая, что $mg = F_0$, получим:

$$F = \frac{F_1 - mg}{2} = \frac{F_1 - F_0}{2}.$$

Можно предположить, что сила поверхностного натяжения $\vec{F}$ прямо пропорциональна длине l поверхностного слоя жидкости, т. е. длине проволоки. Ведь на всех участках поверхностного слоя жидкости молекулы находятся в одинаковых условиях. Убедиться в справедливости этого предположения можно, взяв другую проволочку со стороной AB, вдвое большей длины. Сила поверхностного натяжения окажется в два раза большей.

Коэффициент поверхностного натяжения. Отношение модуля F силы поверхностного натяжения, действующей на границу поверхностного слоя длиной l, к этой длине есть величина постоянная, не зависящая от длины l. Эту величину называют коэффициентом поверхностного натяжения и обозначают буквой σ[1]:

$$\sigma = \frac{F}{l}. \qquad (6.1)$$

[1] σ — греческая буква «сигма».

Коэффициент поверхностного натяжения зависит от природы граничащих сред и от температуры. Его выражают в ньютонах на метр (Н/м).

По мере повышения температуры различие между жидкостью и насыщенным паром этой жидкости постепенно стирается и при критической температуре исчезает совсем. Соответственно коэффициент поверхностного натяжения для границы «жидкость — насыщенный пар» с повышением температуры уменьшается и при критической температуре становится равным нулю.

Согласно формуле (6.1) модуль силы поверхностного натяжения, действующей на границу поверхностного слоя длины l, равен:

$$F = \sigma l. \qquad (6.2)$$

Причем сила поверхностного натяжения направлена по касательной к поверхности перпендикулярно к границе поверхностного слоя (перпендикулярно проволочке AB в данном случае, см. рис. 60, 61). Сила пропорциональна длине, а коэффициентом пропорциональности является коэффициент поверхностного натяжения.

28. КАПИЛЛЯРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Смачивание. На границе жидкостей с твердыми телами наблюдается смачивание. *Смачивание — явление, возникающее вследствие взаимодействия молекул жидкости с молекулами твердых тел и приводящее к искривлению поверхности жидкости у поверхности твердого тела.*

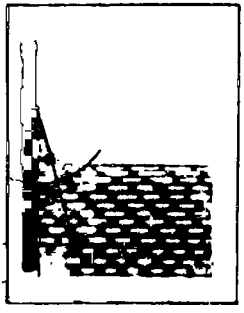
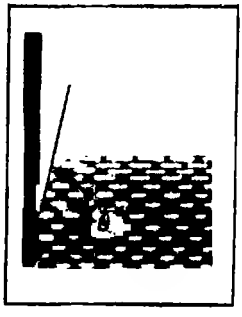


Рис. 62

Силами притяжения молекул жидкости к молекулам газа можно пренебречь, но не учитывать взаимодействия между молекулами жидкости и твердого тела нельзя. Форма поверхности жидкости, соприкасающейся с твердым телом, зависит от того, какие силы притяжения больше: между молекулами жидкости и твердого тела или между молекулами самой жидкости?

Рис. 63



В первом случае жидкость будет смачивающей и ее форма у стенки сосуда такой (рис. 62), что угол θ между плоскостью, касательной к поверхности жидкости, и стенкой острый (жидкость прилипает к стенке). Во втором случае жидкость не смачивает твердую поверхность и угол θ (рис. 63) тупой (жидкость отходит от стенки).

Рассмотрим лишь случаи полного смачивания (угол $\Theta = 0^\circ$) и полного несмачивания (угол $\Theta = 180^\circ$).

Капиллярные явления. *Под капиллярными явлениями понимают подъем или опускание жидкости в узких трубках — капиллярах*[1],— по сравнению с уровнем жидкости в широких трубках.

Смачивающая жидкость (например, вода в стеклянной трубке) поднимается по капилляру. При этом, чем меньше радиус трубки, тем на большую высоту она поднимается (рис. 64). Если рассматривать искривленную поверхность жидкости в капилляре через лупу, то она оказывается похожей на растянутую резиновую пленку, прикрепленную к стенкам трубки и прогнувшуюся вниз (рис. 65).

В капиллярах изогнутую поверхность жидкости при полном смачивании или несмачивании можно принять за полусферу, радиус которой равен радиусу канала трубки r.

Вдоль границы поверхностного слоя, имеющей форму окружности, на стенки трубки действует сила поверхностного натяжения (6.2), направленная вниз. По третьему закону Ньютона такая же по модулю сила действует на жидкость со стороны стенок трубки вверх. Эта сила и заставляет жидкость подниматься. Так как длина окружности $l = 2\pi r$, то эта сила равна:

$$F = \sigma 2\pi r. \tag{6.3}$$

Поднятие жидкости в капилляре прекращается, когда сила (6.3) уравновесится силой тяжести $m\vec{g}$, действующей на поднятый столбик жидкости:

$$\vec{F} = -m\vec{g}. \tag{6.4}$$

Обозначим высоту поднятия жидкости в капилляре через h. Тогда объем поднятой жидкости (объем цилиндра) будет равен: $V = \pi r^2 h$. Модуль силы тяжести равен:

$$mg = \varrho g V = \varrho g h \pi r^2, \tag{6.5}$$

где ϱ — плотность жидкости.

[1] Термин «капилляр» происходит от латинского слова capillus — волос.

Рис. 64

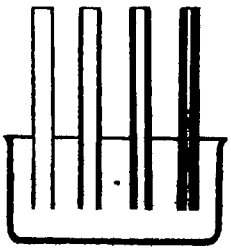
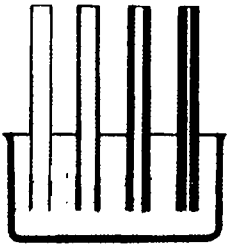


Рис. 65

Рис 66



Подставляя в уравнение (6.4) выражения (6.3) и (6.5) для модулей сил, получим:

$$2\sigma\pi r = \varrho g h \pi r^2.$$

Отсюда высота поднятия смачивающей жидкости в капилляре равна:

$$h = \frac{2\sigma}{\varrho g r} \qquad (6.6)$$

Рис. 67

Жидкость, не смачивающая стенки капилляра (например, ртуть в стеклянной трубке), опускается ниже уровня жидкости в широком сосуде (рис. 66). Глубина h, на которую опускается жидкость, также определяется формулой (6.6).

Тела, пронизанные большим числом тонких каналов (капилляров), активно впитывают в себя воду и другие жидкости. Необходимо только, чтобы жидкости смачивали поверхность тела. Именно по этой причине полотенце впитывает в себя воду при вытирании рук. В фитиле керосинки или лампы керосин непрерывно поднимается по капиллярам вверх, где и сгорает.

Обычные кирпичи — пористые тела, они хорошо впитывают влагу. Поэтому кирпичные дома в своей нижней части должны быть изолированы от влаги.

Благодаря многочисленным капиллярам в почве вода поднимается вверх и интенсивно испаряется (рис. 67). Это ведет к потере влаги, необходимой растениям.

1. Приведите примеры действия сил поверхностного натяжения, не упомянутые в тексте. 2. В чем состоит сходство и в чем различие сил поверхностного натяжения и сил упругости? 3. Что называется коэффициентом поверхностного натяжения? 4. От чего зависит коэффициент поверхностного натяжения? 5. Что называют силой поверхностного натяжения? 6. Какой формулой определяется высота поднятия жидкости в капилляре?

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задачи данной главы отличаются от обычных задач на гидростатику лишь тем, что в них принимается во внимание еще одна сила — сила поверхностного натяжения (6.2).

Для решения многих задач используется формула (6.6), определяющая высоту поднятия жидкости в капилляре.

1. Смачиваемый водой кубик массой $m = 0{,}02$ кг плавает на поверхности воды. Ребро кубика имеет длину $a = 0{,}03$ м. На каком расстоянии x от поверхности воды будет находиться нижняя грань кубика?

Решение. Архимедова сила $a^2 x \varrho \vec{g}$, направленная вверх, уравновешивает силу тяжести кубика $m\vec{g}$ и силу поверхностного

натяжения. Сила поверхностного натяжения согласно (6.2) равна $4a\sigma$ и действует на кубик вниз. Следовательно, для проекций сил на ось X, направленную вверх, имеем:

$$a^2x\varrho g - mg - 4a\sigma = 0.$$

Отсюда

$$x = \frac{mg + 4a\sigma}{a^2\varrho g}; \qquad x \approx 0{,}023 \text{ м}.$$

Силы поверхностного натяжения вносят поправку около 1 мм.

2. Вертикальная капиллярная трубка радиусом $r = 10^{-4}$ м погружена в ртуть. Считая, что ртуть абсолютно не смачивает материала трубки, определить давление ртути в капилляре непосредственно под выпуклой (полусферической) поверхностью жидкости. Давление атмосферы не учитывать.

Р е ш е н и е. Из условия равновесия столба жидкости в трубке следует, что давление непосредственно под поверхностью в трубке и на том же уровне снаружи трубки одинаково. Это давление равно $p = \varrho gh$, где h — глубина, на которой находится уровень ртути в трубке. Подставляя h из формулы (6.6), получим:

$$p = \frac{2\sigma}{r}; \qquad p = \frac{9{,}4 \cdot 10^{-1}}{10^{-4}} \text{ Па} \approx 9400 \text{ Па}.$$

Упр. 6

1. В водный раствор спирта помещают ложку оливкового масла (опыт Плато). Какую форму примет масло, если его плотность равна плотности раствора?

2. Найти с помощью опыта, увеличивается или уменьшается поверхностное натяжение воды в результате растворения в ней сахара, мыла.

3. Раствор жира в бензине имеет больший коэффициент поверхностного натяжения, чем чистый бензин. Центр или края жирного пятна на ткани нужно смачивать бензином при удалении пятна?

4. Проволочка диаметром 0,1 мм подвешена к чашке чувствительных весов и частично погружена в сосуд с водой. Коэффициент поверхностного натяжения воды $7{,}3 \cdot 10^{-2}$ Н/м. Какова сила, действующая дополнительно на весы из-за того, что воды смачивает проволочку.

5. Почему разрыхление почвы при бороновании способствует сохранению в ней влаги?

6. Спирт поднялся по капиллярной трубке на высоту 55 мм, а вода — на высоту 146 мм. Определить плотность спирта.

КРАТКИЕ ИТОГИ ГЛАВЫ VI

Силой поверхностного натяжения называют силу, которая действует вдоль поверхности жидкости перпендикулярно к линии, ограничивающей эту поверхность, и стремится сократить ее до минимума. Модуль силы поверхностного натяжения, действующей на границу поверхностного слоя длины l, равен:

$$F = \sigma l,$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения. Этот коэффициент зависит от природы граничащих сред и от температуры.

Благодаря силам поверхностного натяжения жидкости, смачивающие поверхность тонких трубок — капилляров, поднимаются вверх, а жидкости, не смачивающие поверхность трубок, опускаются вниз. Высота поднятия (или опускания) жидкости равна:

$$h = \frac{2\sigma}{\varrho g r},$$

где ϱ — плотность жидкости, g — ускорение свободного падения, r — радиус капилляра.

Глава VII.
ТВЕРДЫЕ ТЕЛА

29. КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ТЕЛА

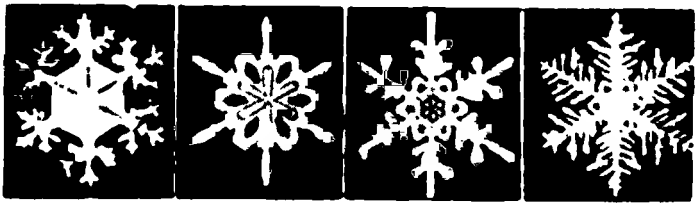
Твердые тела сохраняют не только свой объем, как жидкости, но и форму. Твердые тела находятся преимущественно в кристаллическом состоянии.

Кристаллы — это твердые тела, атомы или молекулы которых занимают определенные, упорядоченные положения в пространстве (см. § 5). Следствие этого — правильная внешняя форма кристалла. Например, крупинка обычной поваренной соли имеет плоские грани, составляющие друг с другом прямые углы (рис. 68). Это можно заметить, рассматривая соль с помощью лупы. А как геометрически правильна форма снежинки! В ней также отражена геометрическая правильность внутреннего строения кристаллического твердого тела — льда (рис. 69).

Анизотропия кристаллов. Однако правильная внешняя форма не единственное и даже не самое главное следствие упорядоченного строения кристалла. Главное — это зависимость физических свойств от выбранного в кристалле направления. Прежде всего бросается в глаза различная механическая прочность кристалла

Рис. 68

Рис. 69



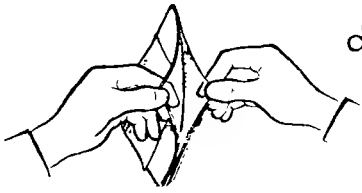


Рис. 70

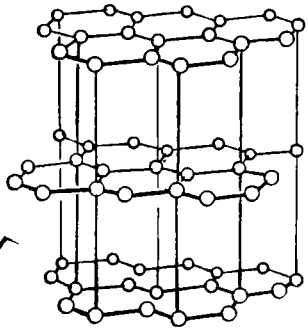


Рис. 71

Рис. 72

по разным направлениям. Кусок слюды легко расслаивается в одном из направлений на тонкие пластинки (рис. 70). Расслоить его в направлении, перпендикулярном пластинкам, гораздо труднее. Так же легко расслаивается по одному направлению кристалл графита. Когда вы пишете карандашом, такое расслоение происходит непрерывно и тонкие слои графита остаются на бумаге. Это происходит потому, что кристаллическая решетка графита имеет слоистую структуру. Слои образованы рядом параллельных плоских сеток, состоящих из атомов углерода (рис. 71). Атомы располагаются в вершинах правильных шестиугольников. Расстояние между слоями сравнительно велико: примерно в два раза больше, чем длина стороны шестиугольника. Поэтому связи между слоями менее прочны, чем связи внутри них.

Многие кристаллы по-разному проводят тепло и электрический ток в различных направлениях. Зависят от направления и оптические свойства кристаллов. Так, кристалл кварца по-разному преломляет свет в зависимости от направления падающих на него лучей.

Зависимость физических свойств от направления внутри кристалла называют анизотропией[1]. *Все кристаллические тела анизотропны.*

Монокристаллы и поликристаллы. Кристаллическую структуру имеют металлы. Именно металлы преимущественно используются в настоящее время для изготовления орудий труда, различных машин и механизмов.

Если взять сравнительно большой кусок металла, то на первый взгляд его кристаллическое строение никак не проявляется ни во внешнем виде куска, ни в его физических свойствах. Металлы в обычном состоянии не обнаруживают анизотропии.

Дело здесь в том, что обычно металл состоит из огромного количества сросшихся друг с другом маленьких кристалликов.

[1] От греческих слов: «анизос» — неравный, «тропос» — направление.

Под микроскопом или даже с помощью лупы их нетрудно рассмотреть особенно на свежем изломе металла (рис. 72). Свойства каждого кристаллика различны по разным направлениям, но кристаллики ориентированы друг по отношению к другу хаотически. В результате в объеме, значительно превышающем объем отдельных кристалликов, все направления внутри металлов равноправны и их свойства одинаковы по всем направлениям.

Твердое тело, состоящее из большого числа маленьких кристалликов, называют поликристаллическим. Одиночные кристаллы называют монокристаллами.

Соблюдая большие предосторожности, можно вырастить металлический кристалл больших размеров — монокристалл. В обычных условиях поликристаллическое тело образуется в результате того, что начавшийся рост многих кристаллов продолжается до тех пор, пока они не приходят в соприкосновение друг с другом, образуя единое тело.

К поликристаллам относятся не только металлы. Кусок сахара, например, также имеет поликристаллическую структуру.

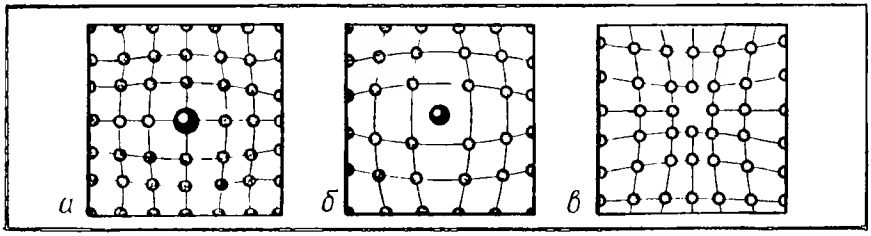
Дефекты в кристаллах. Во всех реальных кристаллах наблюдаются нарушения строгой периодичности в расположении атомов. Эти нарушения называют дефектами в кристаллах. Дефекты образуются в процессе роста кристаллов под влиянием теплового движения молекул, механических воздействий, облучения потоками частиц и пр.

Наиболее простыми являются точечные дефекты. Они возникают при замещении одного из атомов кристаллической решетки атомом примеси (рис. 73, *а*), внедрении атома между узлами решетки (рис. 73, *б*) или в результате образования вакансий — отсутствия атома в одном из узлов решетки (рис. 73, *в*).

Гораздо большее влияние на механические и другие свойства кристаллов оказывают линейные дефекты, при которых нарушения структуры решетки сосредоточены вблизи протяженных линий. Такие дефекты называют дислокациями (смещениями).

Атомные плоскости (атомные слои) часто обрываются внутри кристалла. В результате образуется лишняя полуплоскость (рис. 74). Такая дислокация называется краевой.

Рис. 73



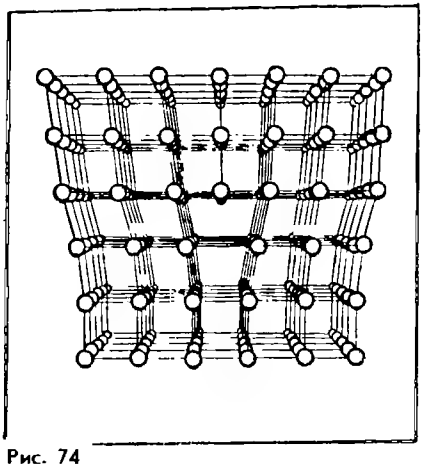
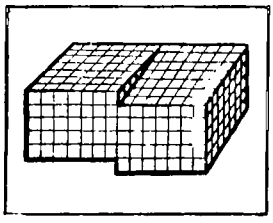


Рис. 74

Рис 75



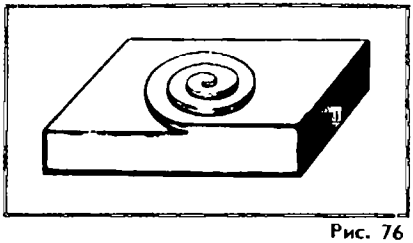


Рис. 76

Более сложной является винтовая дислокация. Наглядно ее можно представить как результат «разреза» решетки по полуплоскости (рис. 75) и сдвига частей решетки по обе стороны разреза на одно межатомное расстояние. Кристалл с винтовой дислокацией состоит не из параллельных атомных плоскостей, а, скорее, представляет собой одну плоскость, закрученную в виде винтовой лестницы. Рост такого кристалла происходит путем присоединения атомов к торцу последней ступеньки. В результате кристаллический слой растет, непрерывно накручиваясь сам на себя, а кристалл в процессе роста принимает форму винта (рис. 76).

Количество дислокаций в кристалле меняется в широких пределах[1] от 10^2—10^3 $см^{-2}$ до 10^{11}- 10^{12} $см^{-2}$.

Выращивание кристаллов без дефектов — очень сложная задача, и она решена только для немногих веществ.

Знание условий образования дефектов в кристаллах и способов их устранения играет большую роль при использовании кристаллических тел в технике (см. § 33).

30. АМОРФНЫЕ ТЕЛА

Наряду с кристаллическими твердыми телами встречаются аморфные твердые тела[2]. У аморфных тел в отличие от кристаллов нет строгого порядка в расположении атомов. Только ближайшие атомы — соседи — располагаются в некотором порядке. Но стро-

[1] Количество дислокаций характеризуется числом дислокационных линий, пересекающих единичную площадку в кристалле.

[2] От греческого «морфе», что значит форма, и частицы «а», имеющей смысл отрицания.

гой повторяемости во всех направлениях одного и того же элемента структуры, которая характерна для кристаллов, в аморфных телах нет.

Часто одно и то же вещество может находиться как в кристаллическом, так и в аморфном состоянии. Например, кварц SiO_2 может быть как в кристаллической, так и в аморфной форме (кремнезем). Кристаллическую форму кварца схематически можно представить в виде решетки из правильных шестиугольников (рис. 77, *а*). Аморфная структура кварца также имеет вид решетки, но неправильной формы. Наряду с шестиугольниками в ней встречаются пяти- и семиугольники (рис. 77, *б*).

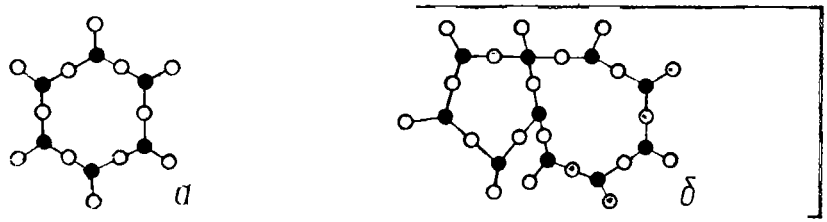
Свойства аморфных тел. Все аморфные тела изотропны[1]: их физические свойства одинаковы по всем направлениям. К аморфным телам принадлежат стекло, многие пластмассы, смола, канифоль, сахарный леденец и др.

При внешних воздействиях аморфные тела обнаруживают одновременно упругие свойства, подобно твердым телам, и текучесть, подобно жидкостям. При кратковременных воздействиях (ударах) они ведут себя как твердое тело и при сильном ударе раскалываются на куски. Но при очень продолжительном воздействии аморфные тела текут. Так, например, кусок смолы постепенно растекается по твердой поверхности. Атомы или молекулы аморфных тел, подобно молекулам жидкости, имеют определенное время «оседлой жизни» — время колебаний около положения равновесия. Но в отличие от жидкостей это время у них весьма велико. В этом отношении аморфные тела близки к кристаллическим, так как перескоки атомов из одного положения равновесия в другое происходят редко.

При низких температурах аморфные тела по своим свойствам напоминают твердые тела. Текучестью они почти не обладают, но по мере повышения температуры постепенно размягчаются и их свойства все более и более приближаются к свойствам жидкостей. Это происходит потому, что с ростом температуры постепенно учащаются перескоки атомов из одного положения рав-

[1] От греческих слов: «изос» — равный, «тропос» — направление.

Рис. 77



новесия в другое. Никакой определенной температуры плавления у аморфных тел, в отличие от кристаллических, нет.

Физика твердого тела. Все свойства твердых тел (кристаллических и аморфных) могут быть объяснены на основе знания их атомно-молекулярной структуры и законов движения молекул, атомов, ионов и электронов, слагающих твердые тела. Исследования свойств твердых тел объединены в большой области современной физики – физики твердого тела. Развитие физики твердого тела стимулируется в основном потребностями техники. Приблизительно половина физиков мира работает в области физики твердого тела. Разумеется, достижения в этой области немыслимы без глубоких знаний всех остальных разделов физики.

? **1. Чем отличаются кристаллические тела от аморфных? 2. Что такое анизотропия? 3. Приведите примеры монокристаллических, поликристаллических и аморфных тел. 4. Чем отличаются краевые дислокации от винтовых?**

31. ДЕФОРМАЦИЯ. ВИДЫ ДЕФОРМАЦИЙ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Деформация твердого тела. *Деформацией называется изменение формы или объема тела.*

Деформация возникает в случае, когда различные части тела совершают неодинаковые перемещения. Так, например, если резиновый шнур растянуть за концы, то части шнура сместятся друг относительно друга, шнур окажется деформированным – станет длиннее (и тоньше).

В § 4 было показано, что при деформации изменяются расстояния между частицами тела (атомами или молекулами), вследствие чего возникают силы упругости.

Деформации, которые полностью исчезают после прекращения действия внешних сил, называются упругими. Упругую деформацию испытывает, например, пружина, восстанавливающая свою первоначальную форму после снятия подвешенного к ее концу груза.

Деформации, которые не исчезают после прекращения действия внешних сил, называются пластическими. Пластическую деформацию уже при небольших (но не кратковременных) усилиях испытывают воск, пластилин, глина, свинец.

Рис. 78

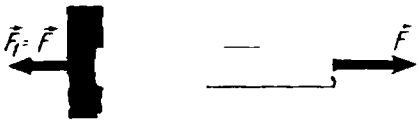
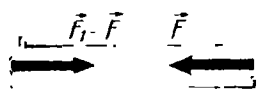


Рис. 79



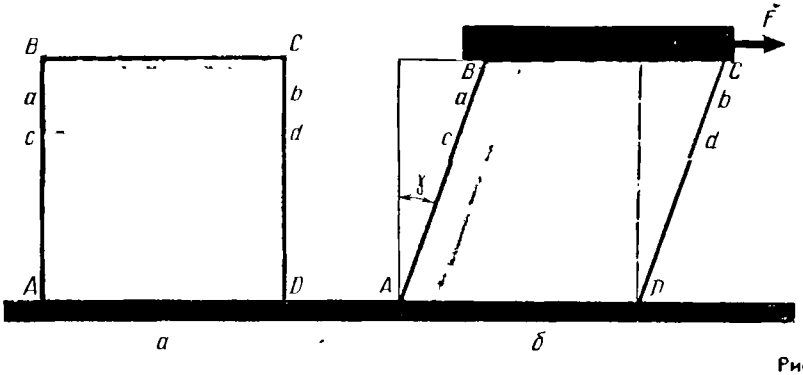


Рис. 80

Любые деформации твердых тел можно свести к двум видам: растяжению (или сжатию) и сдвигу.

Деформация растяжения (сжатия). Если к однородному стержню, закрепленному на одном конце, приложить силу $\vec{F}$ вдоль оси стержня в направлении от него (рис. 78), то стержень подвергнется деформации растяжения. Деформацию растяжения характеризуют абсолютным удлинением $\Delta l = l - l_0$ и относительным удлинением

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0},$$

где l_0 — начальная длина, а l — конечная длина стержня.

Деформацию растяжения испытывают тросы, канаты, цепи в подъемных устройствах, стяжки между вагонами и т. п.

При малых растяжениях ($\Delta l \ll l_0$) деформации большинства тел упругие.

Если на закрепленный стержень подействовать силой $\vec{F}$, направленной вдоль его оси к стержню (рис. 79), то стержень подвергнется сжатию. В этом случае относительная деформация ε отрицательна: $\varepsilon < 0$.

Деформацию сжатия испытывают столбы, колонны, стены, фундаменты зданий и т. п.

При растяжении или сжатии изменяется площадь поперечного сечения тела. Это можно обнаружить, растягивая резиновую трубку, на которую предварительно надето металлическое кольцо. При достаточно сильном растяжении кольцо упадет. При сжатии, наоборот, площадь поперечного сечения тела увеличивается. Впрочем, для большинства твердых тел эти эффекты малы.

Деформация сдвига. Возьмем резиновый брусок с начерченными на его поверхности горизонтальными и вертикальными линиями и закрепим на столе (рис. 80, *а*). Сверху к бруску прикрепим рейку и приложим к ней горизонтальную силу (рис. 80, *б*). Слои *ab*, *cd* и т. д. бруска сдвинутся, оставаясь параллельными,

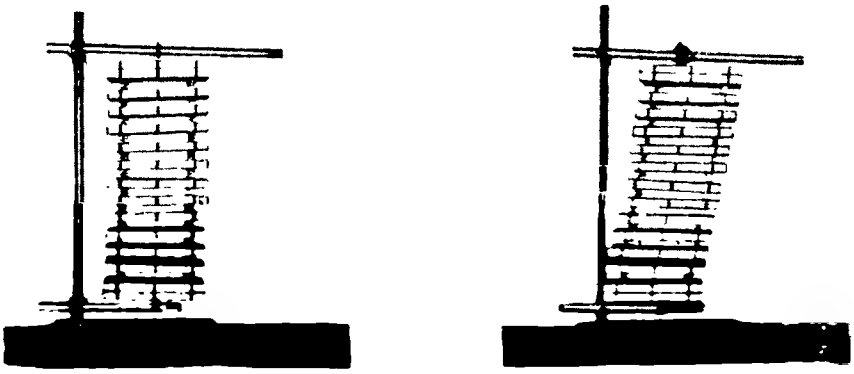


Рис. 81 *а* *б*

а вертикальные грани, оставаясь плоскими, наклонятся на угол γ. Такого рода деформацию, при которой происходит смещение слоев тела друг относительно друга, называют деформацией сдвига.

Если силу $\vec{F}$ увеличить в два раза, то и угол γ увеличится в два раза. Опыты показывают, что *при упругих деформациях угол сдвига γ прямо пропорционален модулю F приложенной силы.*

Деформацию сдвига можно наглядно продемонстрировать на модели твердого тела, представляющей собой ряд параллельных пластин, соединенных между собой пружинами (рис. 81, *а*). Горизонтальная сила сдвигает пластины друг относительно друга без изменения объема тела (рис. 81, *б*). При деформации сдвига у реальных твердых тел объем их также не меняется.

Деформации сдвига подвержены все балки в местах опор, заклепки (рис. 82) и болты, скрепляющие детали, и т. д. Сдвиг на большие углы может привести к разрушению тела — срезу. Срез происходит при работе ножниц, долота, зубила, зубьев пилы.

Деформация изгиба. Деформации изгиба подвергается стержень, опирающийся концами на подставки и нагруженный посередине или закрепленный на одном конце и нагруженный на другом (рис. 83).

Рис. 82

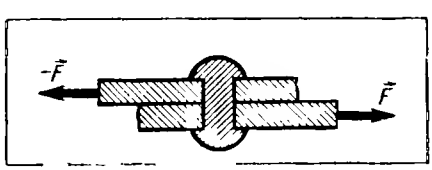
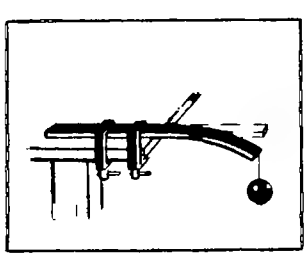


Рис. 83



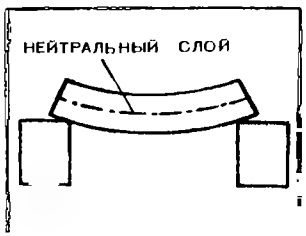


Рис. 84

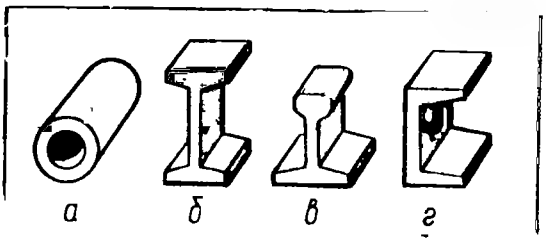


Рис. 85

При изгибе одна сторона — выпуклая — подвергается растяжению, а другая — вогнутая — сжатию. Внутри изгибаемого тела расположен слой, не испытывающий ни растяжения, ни сжатия, называемый нейтральным (рис. 84).

Таким образом, изгиб – деформация, сводящаяся к растяжениям (сжатиям), различным в разных частях тела.

Вблизи нейтрального слоя тело почти не испытывает деформаций. Следовательно, в этом слое малы и возникающие при деформации силы. Значит, площадь поперечного сечения изгибаемой детали в окрестности нейтрального слоя можно значительно уменьшить. В современной технике и в строительстве вместо стержней и сплошных брусьев повсеместно применяют трубы (рис. 85, *а*), двутавровые балки (рис. 85, *б*), рельсы (рис. 85, *в*), швеллеры (рис. 85, *г*), чем добиваются облегчения конструкций и экономии материала.

Деформация кручения. Если на стержень, один конец которого закреплен, действуют параллельные и противоположно направленные силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ (рис. 86), лежащие в плоскости, перпендикулярной оси стержня, то возникает деформация, называемая кручением. При кручении отдельные слои тела, как и при сдвиге, остаются параллельными, но поворачиваются друг относительно друга на некоторый угол. Деформация кручения представляет собой неоднородный сдвиг.

Эта деформация возникает, например, при завинчивании гаек (рис. 87). Деформации кручения подвергаются также валы машин, сверла и т. д.

Рис. 86

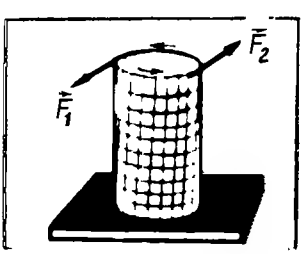
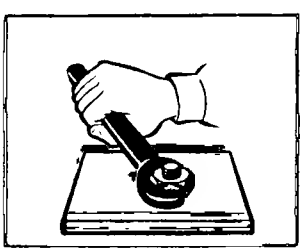


Рис. 87



32. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ. ДИАГРАММА РАСТЯЖЕНИЯ

Чтобы строить надежные дома, мосты, станки, разнообразные машины, необходимо знать механические свойства используемых материалов: бетона, стали, железобетона, пластмасс и т. д. Конструктор должен заранее знать поведение материалов при значительных деформациях, условия, при которых материалы начнут разрушаться. Сведения о механических свойствах различных материалов получают экспериментально.

В этом параграфе мы рассмотрим механические свойства твердого тела на примере исследования деформации растяжения. Но предварительно введем еще одно важное понятие.

Напряжение. В любом сечении деформированного тела действуют силы упругости, препятствующие разрыву тела на части (рис. 88). Состояние деформированного тела характеризуют особой величиной, называемой напряжением или, точнее, механическим напряжением. **Напряжение — величина, равная отношению модуля F силы упругости к площади поперечного сечения S тела:**

$$\sigma = \frac{F}{S}. \qquad (7.1)$$

В СИ за единицу напряжения принимается $1\ \text{Па} = 1\ \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$.

Диаграмма растяжения. Для исследования деформации растяжения стержень из исследуемого материала при помощи специальных устройств подвергают растяжению и измеряют удлинение образца и возникающее в нем напряжение. По результатам опытов вычерчивают график зависимости напряжения σ от относительного удлинения ε, получивший название диаграммы растяжения (рис. 89).

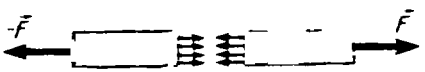
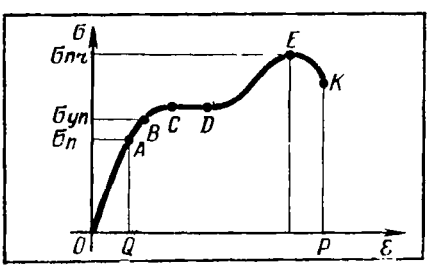


Рис. 88

Рис. 89



Закон Гука. Опыт показывает, что **при малых деформациях напряжение σ прямо пропорционально относительному удлинению ε** (участок OA диаграммы). Эта зависимость, называемая законом Гука, записывается так:

$$\sigma = E|\varepsilon|. \qquad (7.2)$$

Относительное удлинение ε в формуле (7.2) взято по модулю, так как закон Гука справедлив как для деформации растяжения, так и для деформации сжатия, когда $\varepsilon < 0$.

Коэффициент пропорциональности E, входящий в закон Гука, называется модулем упругости или модулем Юнга.

Если относительное удлинение $\varepsilon=1$, то $\sigma=E$. Следовательно, модуль Юнга равен напряжению, возникающему в стержне при его относительном удлинении, равном 1. Так как $\varepsilon=\frac{\Delta l}{l_0}$, то при $\varepsilon=1$ $\Delta l=l_0$. А это значит, что модуль Юнга равен напряжению, возникающему при удвоении длины образца. Практически любое тело при упругой деформации не может удвоить свою длину; значительно раньше любой стержень разорвется. Поэтому модуль Юнга определяют по формуле (7.2), измеряя напряжение σ и относительное удлинение ε при малых деформациях.

Для большинства широко распространенных материалов модуль Юнга определен экспериментально. Так, для хромоникелевой стали $E=2{,}1\cdot10^{11}$ Па, а для алюминия $E=7\cdot10^{7}$ Па. Чем больше E, тем меньше деформируется стержень при прочих равных условиях (одинаковых F, S, l_0). Модуль Юнга характеризует сопротивляемость материала упругой деформации растяжения (сжатия).

Закон Гука, записанный в форме (7.2), легко привести к виду, известному из курса физики VIII класса.

Действительно, подставив в (7.2) $\sigma=\frac{F}{S}$ и $\varepsilon=\frac{|\Delta l|}{l_0}$, получим:

$$\frac{F}{S}=E\frac{|\Delta l|}{l_0}.$$

Отсюда

$$F=\frac{SE}{l_0}|\Delta l|. \tag{7.3}$$

Обозначим $\frac{SE}{l_0}=k$, тогда

$$F=k|\Delta l|. \tag{7.4}$$

Таким образом, жесткость k стержня прямо пропорциональна произведению модуля Юнга на площадь поперечного сечения стержня и обратно пропорциональна его длине.

Пределы пропорциональности и упругости. Мы уже говорили, что закон Гука выполняется при небольших деформациях, а следовательно, при напряжениях, не превосходящих некоторого предела. **Максимальное напряжение $\sigma_п$, при котором еще выполняется закон Гука, называют пределом пропорциональности.**

Если увеличивать нагрузку, то деформация становится нелинейной: напряжение перестает быть прямо пропорциональным относительному удлинению. Тем не менее при небольших нелинейных деформациях после снятия нагрузки форма и размеры тела практически восстанавливаются (участок AB диаграммы). **Максимальное напряжение, при котором еще не возникают заметные остаточные деформации** (относительная остаточная деформация не превышает 0,1%), **называют пределом упругости** $\sigma_{уп}$. Предел

упругости превышает предел пропорциональности лишь на сотые доли процента.

Предел прочности. Если внешняя нагрузка такова, что напряжение в материале превышает предел упругости, то после снятия нагрузки образец хотя и укорачивается, но не принимает прежних размеров, а остается деформированным.

По мере увеличения нагрузки деформация нарастает все быстрее и быстрее. При некотором значении напряжения, соответствующем на диаграмме точке C, удлинение нарастает практически без увеличения нагрузки. Это явление называют текучестью материала (участок CD). Кривая на диаграмме идет при этом почти горизонтально.

Далее с увеличением деформации ε кривая напряжений начинает немного возрастать и достигает максимума в точке E. Затем напряжение быстро спадает и образец разрушается (точка K). Таким образом, *разрыв происходит после того, как напряжение достигает максимального значения* σ_{max}, *называемого пределом прочности* (образец растягивается без увеличения внешней нагрузки вплоть до разрушения). Эта величина зависит от материала образца и его обработки.

33. ПЛАСТИЧНОСТЬ И ХРУПКОСТЬ

Тело из любого материала при малых деформациях ведет себя как упругое. Его размеры и форма восстанавливаются при снятии нагрузки. В то же время почти все тела в той или иной мере могут испытывать пластические деформации.

Механические свойства материалов разнообразны. Такие материалы, как резина или сталь, обнаруживают упругие свойства при сравнительно больших напряжениях и деформациях. Для стали, например, закон Гука выполняется вплоть до $\varepsilon = 1\%$, а для резины — до значительно больших ε, порядка десятков процентов. Поэтому такие материалы называют упругими.

Пластичность. У мокрой глины, пластилина или свинца область упругих деформаций мала. *Материалы, у которых незначительные нагрузки вызывают пластические деформации, называют пластичными.*

Деление материалов на упругие и пластичные в значительной мере условно. В зависимости от возникающих напряжений один и тот же материал будет вести себя или как упругий, или как пластичный. Так, при очень больших напряжениях сталь обнаруживает пластичные свойства. Это широко используют при штамповке стальных изделий с помощью прессов, создающих огромную нагрузку.

Холодная сталь или железо с трудом поддаются ковке молотом. Но после сильного нагрева им легко придать посредством ковки любую форму. Пластичный при комнатной температуре свинец

приобретает ярко выраженные упругие свойства, если его охладить до температуры ниже —100°С.

Хрупкость. Большое значение на практике имеет свойство твердых тел, называемое хрупкостью. *Материал называют хрупким, если он разрушается при небольших деформациях.* Изделия из стекла и фарфора хрупкие: они разбиваются на куски при падении на пол даже с небольшой высоты. Чугун, мрамор, янтарь также обладают повышенной хрупкостью. Наоборот, сталь, медь, свинец и т. д. не являются хрупкими.

У всех хрупких материалов напряжение очень быстро растет с увеличением деформации, и они разрушаются при весьма малых деформациях. Так, чугун разрушается при относительном удлинении 0,45%. У стали же при $\varepsilon = 0{,}45\%$ деформация остается упругой и разрушение происходит при $\varepsilon \approx 15\%$.

Пластические свойства у хрупких материалов практически не проявляются.

Механизм пластических деформаций. При упругих деформациях в кристаллических телах атомы лишь незначительно смещаются друг относительно друга.

При пластических деформациях смещения атомов или молекул могут во много раз превышать расстояния между ними. Однако нарушения всей кристаллической структуры тела не происходит. Отдельные слои кристаллической решетки проскальзывают друг относительно друга. На рисунке 90 изображен маленький кристалл меди после растяжения. Хорошо видны следы скольжения слоев.

Характерно, что у всех кристаллов скольжение атомных слоев происходит не сразу по всему объему кристалла, а осуществляется за счет передвижения дислокаций. Перемещение же дислокаций связано с перестройкой решетки, затрагивающей одновременно лишь небольшую группу атомов вдоль одной линии. Этот процесс подобен перемещению складки по ковру: складку перемещать легче, чем весь ковер, а в результате ковер в целом сдвигается на некоторое расстояние.

Итак, пластические деформации связаны с наличием дислокаций в кристаллах и возможностью их перемещений. Эти перемещения тормозятся различными препятствиями: атомами примесей, твердыми микроскопическими включениями, границами кристаллических зерен в поликристаллах. Кроме того, дислокации тормозятся при «взаимных пересечениях».

Наиболее прочными были бы кристаллы, совершенно лишенные дислокаций. Но в реальных кристаллах они всегда имеются. Если число дислокаций сравнительно невелико, то они практически перемещаются без торможения и прочность кристалла не-

Рис. 90

велика. Упрочение кристалла может быть достигнуто включением в него примесей или уменьшением зерен в поликристаллах, а также увеличением числа дислокаций.

В технике широко используют повышение прочности металлов путем введения в них специальных добавок: никеля, вольфрама, ванадия и др.

Пластические деформации сами могут приводить к увеличению количества дислокаций и тем самым увеличивать прочность кристаллов. Этот способ повышения прочности называют наклепом. Наклеп осуществляют, протягивая металлические заготовки между валками или другими способами. Однако чрезмерное увеличение числа дислокаций делает кристаллическую решетку неустойчивой, и материал теряет прочность.

Таким образом, изучение структуры твердого тела и улучшение на этой основе механических свойств материалов приводит к повышению их прочности и тем самым к уменьшению веса машин и механизмов, увеличению их надежности.

? **1. Перечислите основные виды деформаций твердых тел. 2. Что называют механическим напряжением? 3. Как связано механическое напряжение с относительным удлинением? 4. Чем отличаются упругие деформации от пластических? 5. Что называют пределом прочности? 6. Какие материалы называют хрупкими? 7. Каким образом дислокации влияют на пластические деформации и прочность кристаллов?**

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

В расчетных задачах на материал данной главы используется понятие напряжения (формула 7.1) и закон Гука в форме (7.2) и (7.3).

1. Чему равно относительное укорочение стального стержня, сжатого силой $F = 3{,}14 \cdot 10^5$ Н, если диаметр стержня $D = 2$ см, а его модуль Юнга $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па?

Решение. Согласно закону Гука (7.3)

$$|\varepsilon| = \frac{|\Delta l|}{l_0} = \frac{F}{ES},$$

где $S = \frac{\pi D^2}{4}$ — площадь поперечного сечения стержня.

Следовательно, $|\varepsilon| = \frac{4F}{\pi D^2 E} = 0{,}005$ или $|\varepsilon| = 0{,}5\%$.

2. Латунная проволока диаметром $D = 0{,}8$ мм имеет длину $l = 3{,}6$ м. Под действием силы $F = 25$ Н проволока удлиняется на $\Delta l = 2$ мм. Определить модуль Юнга для латуни.

Решение. Модуль Юнга определяется из закона Гука (7.3):

$E = \frac{Fl_0}{S \cdot |\Delta l|}$. Так как $S = \frac{\pi D^2}{4}$, то $E = \frac{4Fl_0}{\pi D^2 \cdot |\Delta l|}$; $E = 9 \cdot 10^{10}$ Па.

Упр. 7

1. Если тело обладает анизотропией, означает ли это, что оно обязательно является кристаллическим?

2. Возникла ли бы профессия стеклодува, если бы стекло было кристаллическим телом, а не аморфным?

3. Плуг сцеплен с трактором стальной тягой. Допустимое напряжение материала тяги $\sigma = 20$ ГПа. Каково должно быть сечение тяги, если сопротивление почвы движению плуга $1{,}6 \cdot 10^5$ Н?

4. Каким должен быть модуль силы, приложенной к стержню вдоль его оси, чтобы в стержне возникло напряжение $1{,}5 \cdot 10^8$ Па? Диаметр стержня 0,4 см.

5. Какое напряжение возникает у основания кирпичной стены высотой 20 м? Плотность кирпича 1800 кг/м^3. Одинаковой ли должна быть прочность кирпичей у основания стены и в верхней ее части?

6. Какую наименьшую длину должна иметь свободно подвешенная за один конец стальная проволока, чтобы она разорвалась под действием силы тяжести? Предел прочности стали $3{,}2 \cdot 10^8$ Па, плотность 7800 кг/м^3.

7. Под действием силы 100 Н проволока длиной 5 м и площадью поперечного сечения 2,5 мм^2 удлинилась на 1 мм. Определить напряжение, испытываемое проволокой, и модуль Юнга.

8. Железобетонная колонна сжимается силой F. Полагая, что модуль Юнга бетона $E_б$ составляет $\frac{1}{10}$ модуля Юнга железа $E_ж$, а площадь поперечного сечения железа составляет $\frac{1}{20}$ площади поперечного сечения бетона, найти, какая часть нагрузки приходится на бетон.

КРАТКИЕ ИТОГИ ГЛАВЫ VII

Твердые тела преимущественно находятся в кристаллическом состоянии. Кристаллы анизотропны: это означает, что физические свойства кристаллов зависят от выбранного направления.

У аморфных тел, в отличие от кристаллов, нет строгого порядка в расположении атомов. При низких температурах аморфные тела по своим свойствам напоминают твердые тела, а при высоких подобны очень вязким жидкостям.

При малых деформациях при снятии нагрузок деформации исчезают. Тела обнаруживают упругие свойства. При упругих деформациях напряжение, т. е. отношение модуля силы упругости к площади поперечного сечения, подчиняется закону Гука:

$$\sigma = E|\varepsilon|,$$

где E — модуль Юнга, характеризующий упругие свойства вещества, а $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ — относительное изменение размеров тела.

Механические свойства твердых тел наиболее наглядно видны на диаграмме растяжения (рис. 89)

Во всех реальных кристаллах наблюдается нарушение строгой периодичности в расположении атомов — дефекты кристаллов. Дефекты бывают точечными и линейными (дислокации). Дефекты в кристаллах влияют на их свойства и определяют прочность кристаллов.

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

34. ЧТО ТАКОЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИКА!

Мы приступаем теперь к изучению нового раздела физики «Электродинамика». Само это название показывает, что речь пойдет о процессах, которые определяются движением и взаимодействием электрически заряженных частиц. Такое взаимодействие называется электромагнитным. Изучение природы этого взаимодействия приведет нас к одному из самых фундаментальных понятий физики — понятию электромагнитного поля.

Электродинамика — это наука о свойствах и закономерностях поведения особого вида материи — электромагнитного поля, осуществляющего взаимодействие между электрически заряженными телами или частицами.

Среди четырех типов взаимодействий, открытых наукой,— гравитационных, электромагнитных, сильных (ядерных) и слабых[1] — именно электромагнитные взаимодействия занимают первое место по широте и разнообразию проявлений. В повседневной жизни и технике мы чаще всего встречаемся с различными видами электромагнитных сил. Это силы упругости, трения, силы наших мышц и мышц различных животных.

Электромагнитные взаимодействия позволяют видеть книгу, которую вы читаете, так как свет — одна из форм электромагнитного поля. Сама жизнь немыслима без этих сил. Живые существа и даже человек, как показали полеты космонавтов, способны длительное время находиться в состоянии невесомости, когда силы всемирного тяготения не оказывают никакого влияния на жизнедеятельность организмов. Но если бы на мгновение прекратилось действие электромагнитных сил, то сразу исчезла бы и жизнь.

При взаимодействии частиц в самых малых системах природы — в атомных ядрах — и при взаимодействии космических тел электромагнитные силы играют важную роль, в то время как сильные и слабые взаимодействия определяют процессы только в очень малых[2] масштабах, а гравитационные — только в космических. Строение атомной оболочки, сцепление атомов в моле-

[1] Слабые взаимодействия вызывают в основном превращения элементарных частиц.

[2] Расстояния, на которых обнаруживаются сильные взаимодействия, имеют порядок 10^{-12} см. Слабые взаимодействия проявляются на еще меньших расстояниях, не превышающих 10^{-17} см.

Максвелл Джемс Клерк (1831—1879)— великий английский физик, создатель теории электромагнитного поля. Уравнения Максвелла для электромагнитного поля лежат в основе всей электродинамики, подобно тому как законы Ньютона составляют основу классической механики. Максвелл является также одним из основателей молекулярно-кинетической теории строения вещества. Он впервые ввел в физику представления о статистических законах, использующих математическое понятие вероятности.

кулы (химические силы) и образование макроскопических количеств вещества определяются исключительно электромагнитными силами. Трудно, почти невозможно указать явления, которые не были бы связаны с действием электромагнитных сил.

К созданию электродинамики привела длинная цепь планомерных исследований и случайных открытий, начиная с обнаружения способности янтаря, потертого о шелк, притягивать легкие предметы и кончая гипотезой великого английского ученого Джемса Клерка Максвелла о порождении магнитного поля переменным электрическим полем. Лишь во второй половине XIX в., после создания электродинамики, началось широкое практическое использование электромагнитных явлений. Изобретение радио А. С. Поповым — одно из важнейших применений принципов новой теории.

При развитии электродинамики впервые научные исследования предшествовали техническим применениям. Если паровая машина была построена задолго до создания теории тепловых процессов, то сконструировать электродвигатель или радиоприемник оказалось возможным лишь после открытия и изучения законов электродинамики.

Бесчисленные практические применения электромагнитных явлений преобразовали жизнь людей на всем земном шаре. Современная цивилизация немыслима без широчайшего применения энергии электрического тока.

Наша задача состоит в изучении основных законов электромагнитных взаимодействий, а также в знакомстве с основными способами получения электрической энергии и использования ее на практике.

Глава VIII.
ЭЛЕКТРОСТАТИКА

35. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД И ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Со словами «электричество», «электрический заряд», «электрический ток» вы встречались много раз и успели к ним привыкнуть. Но попробуйте ответить на вопрос: «Что такое электрический заряд?» — и вы убедитесь, что это не так-то просто. Дело в том, что понятие заряда — это основное, первичное понятие, не сводимое на современном уровне развития наших знаний к каким-либо более простым, элементарным понятиям.

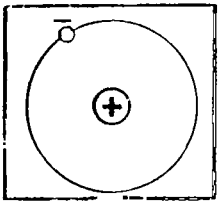
Попытаемся сначала выяснить, что понимают под утверждением: данное тело или частица имеет электрический заряд.

Вы знаете, что все тела построены из мельчайших, неделимых на более простые (насколько сейчас науке известно) частиц, которые поэтому называют элементарными. Все элементарные частицы имеют массу и благодаря этому притягиваются друг к другу согласно закону всемирного тяготения с силой, сравнительно медленно убывающей по мере увеличения расстояния между ними, обратно пропорциональной квадрату расстояния. Большинство элементарных частиц, хотя и не все, кроме того, обладают способностью взаимодействовать друг с другом с силой, которая также убывает обратно пропорционально квадрату расстояния, но эта сила в огромное число раз превосходит силу тяготения. Так, в атоме водорода, изображенном схематически на рисунке 91, электрон притягивается к ядру (протону) с силой, в 10^{39} раз превышающей силу гравитационного притяжения.

Если частицы взаимодействуют друг с другом с силами, которые медленно уменьшаются с увеличением расстояния и во много раз превышают силы всемирного тяготения, то говорят, что эти частицы имеют электрический заряд. *Сами частицы называются заряженными.* Бывают частицы без электрического заряда, но *не существует электрического заряда без частицы.*

Взаимодействия между заряженными частицами носят название электромагнитных. **Электрический заряд — физическая величина, определяющая интенсивность электромагнитных взаимодействий,** подобно тому как масса определяет интенсивность гравитационных взаимодействий.

Рис. 91



Электрический заряд элементарной частицы — это не особый «механизм» в частице, который можно было бы снять с нее, разложить на составные части и снова собрать. Наличие электрического заряда у электрона и других частиц означает лишь существование

определенных силовых взаимодействий между ними. Но мы, в сущности, ничего не знаем о заряде, если не знаем законов этих взаимодействий. Знание законов взаимодействий должно входить в наши представления о заряде. Законы эти не просты, изложить их в нескольких словах невозможно. Вот почему нельзя дать достаточно удовлетворительного краткого определения того, что такое электрический заряд.

Два знака электрических зарядов. Все тела обладают массой и поэтому притягиваются друг к другу. Заряженные же тела могут как притягивать, так и отталкивать друг друга. Этот важнейший факт, знакомый вам из курса физики VII класса, означает, что **в природе есть частицы с электрическими зарядами противоположных знаков. При одинаковых знаках заряда частицы отталкиваются, а при разных притягиваются.**

Заряд элементарных частиц — протонов, входящих в состав всех атомных ядер, называют положительным, а заряд электронов — отрицательным. Между положительными и отрицательными зарядами нет внутренних различий. Если бы знаки зарядов частиц поменялись местами, то от этого характер электромагнитных взаимодействий нисколько бы не изменился.

Элементарный заряд. Кроме электронов и протонов, есть еще несколько типов заряженных элементарных частиц. Но только электроны и протоны могут неограниченно долго существовать в свободном состоянии. Остальные же заряженные частицы живут менее миллионных долей секунды. Они рождаются при столкновениях быстрых элементарных частиц и, просуществовав ничтожно мало, распадаются, превращаясь в другие частицы. С этими частицами вы познакомитесь в X классе.

К частицам, не имеющим электрического заряда, относится нейтрон. Его масса лишь незначительно превышает массу протона. Нейтроны вместе с протонами входят в состав атомного ядра.

Если элементарная частица имеет заряд, то его значение, как показали многочисленные опыты, строго определенно (об одном из таких опытов — опыте Милликена и Иоффе — было рассказано в учебнике для VII класса).

Существует минимальный заряд, называемый элементарным, которым обладают все заряженные элементарные частицы. Заряды элементарных частиц различаются лишь знаками. Отделить часть заряда, например у электрона, невозможно.

36. ЗАРЯЖЕННЫЕ ТЕЛА. ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ТЕЛ

Электромагнитные силы играют в природе огромную роль благодаря тому, что в состав всех тел входят электрически заряженные частицы. Составные части атомов — ядра и электроны обладают электрическим зарядом.

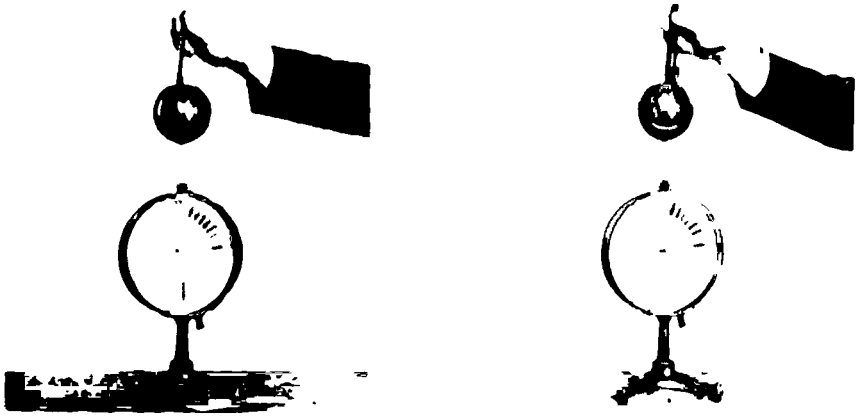


Рис. 92 *а* *б*

Существующие между заряженными частицами электромагнитные силы огромны. Однако действие электромагнитных сил между телами непосредственно не обнаруживается, так как тела в обычном состоянии электрически нейтральны. Нейтрален атом любого вещества, так как число электронов в нем равно числу протонов в ядре. Положительно и отрицательно заряженные частицы связаны друг с другом электрическими силами и образуют нейтральные системы.

Макроскопическое тело электрически заряжено в том случае, если оно содержит избыточное количество элементарных частиц с одним знаком заряда. Отрицательный заряд тела обусловлен избытком электронов по сравнению с протонами, а положительный — недостатком электронов.

Для того чтобы получить электрически заряженное макроскопическое тело, т. е. наэлектризовать его, нужно отделить часть отрицательного заряда от связанного с ним положительного[1]. Это можно сделать с помощью трения. Если провести расческой по сухим волосам, то небольшая часть самых подвижных заряженных частиц — электронов — перейдет с волос на расческу и зарядит ее отрицательно, а волосы зарядятся положительно.

Равенство зарядов при электризации. С помощью опыта можно доказать, что при электризации трением оба тела приобретают противоположные по знаку, но одинаковые по модулю заряды. Возьмем электрометр[2] с укрепленной на его стержне ме-

[1] Здесь и в дальнейшем мы часто для краткости будем говорить о «зарядах», «перемещении зарядов» и т. д. В действительности же при этом имеются в виду «заряженные тела (или частицы)», «перемещение заряженных частиц» и т. д., так как заряда без частицы не существует

[2] Об устройстве электрометра будет подробно рассказано в § 52. Существенных различий в принципе действия электрометра и электроскопа, о котором говорилось в курсе физики VII класса, нет.

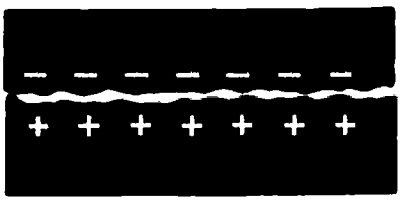
таллической сферой с отверстием и две пластины на длинных рукоятках: одну из эбонита, а другую из плексигласа. При трении друг о друга пластины электризуются. Внесем одну из пластин внутрь сферы, не касаясь ее стенок. Если пластина заряжена положительно, то часть электронов со стрелки и стержня электрометра притянется к пластине и соберется на внутренней поверхности сферы. Стрелка при этом зарядится положительно и оттолкнется от стержня (рис. 92, *а*). Если внести внутрь сферы другую пластину, вынув предварительно первую, то электроны сферы и стержня будут отталкиваться от пластины и соберутся в избытке на стрелке. Это вызовет отклонение стрелки, причем на тот же угол, что и при первом опыте. Опустив обе пластины внутрь сферы, мы не обнаружим отклонения стрелки (рис. 92, *б*). Это доказывает, что заряды пластин равны по модулю и противоположны по знаку.

Как происходит электризация тел? При электризации тел важен тесный контакт между ними. Электрические силы удерживают электроны внутри тела. Но для разных веществ эти силы различны. При тесном контакте небольшая часть электронов того вещества, у которого связь электронов с телом относительно слаба, переходит на другое вещество. Перемещения электронов при этом не превышают размеров межатомных расстояний (10^{-8} см). Но если тела разъединить, то оба они окажутся заряженными.

Так как поверхности тел никогда не бывают идеально гладкими, то необходимый для перехода электронов тесный контакт между телами устанавливается только на небольших участках поверхностей (рис. 93). При трении тел друг о друга число участков с тесным контактом увеличивается и тем самым увеличивается общее число заряженных частиц, переходящих от одного тела к другому.

Электризация тел и ее применение в технике. Значительная электризация происходит при трении синтетических тканей. Снимая нейлоновую рубашку в сухом воздухе, можно слышать характерное потрескивание. Между заряженными участками трущихся поверхностей проскакивают маленькие искорки. С подобными явлениями приходится считаться на производстве. Так, нити пряжи на текстильных фабриках электризуются за счет трения, притягиваются к веретенам и роликам и рвутся. Пряжа притягивает пыль и загрязняется. Приходится применять специальные меры против электризации нитей.

Рис. 93



Электризация тел при тесном контакте используется в электрокопировальных установках (типа «Эра», «Ксерокс» и др.).

Так, в одной из этих установок черный смоляной порошок перемешивается с мельчайшими стеклянными шариками. При этом шарики заряжаются положительно, а частицы порошка — отрицательно. Вследствие притяжения они покрывают поверхность шариков тонким слоем.

Копируемый текст или чертеж проецируется на тонкую селеновую пластину, поверхность которой заряжена положительно. Пластина покоится на отрицательно заряженной металлической поверхности. Под действием света пластина разряжается и положительный заряд остается лишь на участках, соответствующих темным местам изображения. После этого пластина покрывается тонким слоем шариков. Благодаря притяжению разноименных зарядов смоляной порошок притягивается к положительно заряженным участкам пластины. Затем шарики стряхивают и, плотно прижав к пластине лист бумаги, получают на ней отпечаток. Отпечаток закрепляют с помощью нагревания.

37. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА

Опыт с электризацией пластин доказывает, что при электризации трением происходит перераспределение имеющихся зарядов между нейтральными в первый момент телами. Небольшая часть электронов переходит с одного тела на другое. Новые заряженные частицы не возникают, а существовавшие ранее не исчезают. Алгебраическая сумма положительных и отрицательных зарядов тел равна нулю.

При электризации тел выполняется закон сохранения электрического заряда. Этот закон справедлив для системы, в которую не входят извне и из которой не выходят наружу заряженные частицы, т. е. для замкнутой системы. **В замкнутой системе алгебраическая сумма зарядов всех частиц остается неизменной:**

$$q_1 + q_2 + q_3 + \ldots + q_N = \text{const.} \qquad (8.1)$$

Закон сохранения заряда имеет глубокий смысл. Если число заряженных элементарных частиц не изменяется, то выполнение закона сохранения заряда очевидно. Но элементарные частицы могут превращаться друг в друга, рождаться и исчезать, давая жизнь новым частицам[1]. Однако во всех случаях заряженные частицы рождаются только парами с одинаковыми по модулю и противоположными по знаку зарядами. Исчезают заряженные частицы, превращаясь в нейтральные, тоже только парами. Во всех случаях сумма зарядов изолированной системы остается одной и той же.

Справедливость закона сохранения заряда подтверждают наблюдения над огромным числом превращений элементарных час-

[1] Подробно об этом будет рассказано в учебнике физики для X класса.

тиц. Этот закон выражает одно из самых фундаментальных свойств электрического заряда.

Причина сохранения заряда до сих пор неизвестна.

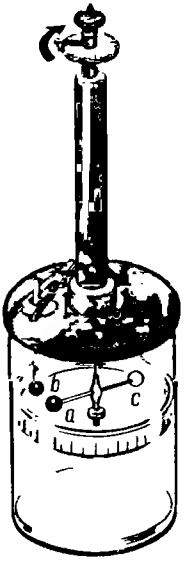
? **1. Какие взаимодействия называют электромагнитными? 2. Что такое элементарный заряд? 3. Приведите примеры явлений, вызванных электризацией тел, которые вы наблюдали в повседневной жизни. 4. Эбонитовая палочка при электризации зарядилась отрицательно. Осталась ли неизменной масса палочки? 5. Сформулируйте закон сохранения электрического заряда. 6. Приведите примеры явлений, в которых наблюдается сохранение заряда.**

38. ОСНОВНОЙ ЗАКОН ЭЛЕКТРОСТАТИКИ — ЗАКОН КУЛОНА

Приступим к изучению количественных законов электромагнитных взаимодействий. Вначале рассмотрим наиболее простой случай, когда электрически заряженные тела находятся в покое. *Раздел электродинамики, посвященный изучению покоящихся электрических зарядов, называют электростатикой.* Основной закон электростатики — закон взаимодействия двух неподвижных точечных заряженных тел или частиц — был экспериментально установлен французским физиком Ш. Кулоном в 1785 г. и носит его имя[1].

Точечных заряженных тел не существует. Но если расстояние между телами во много раз больше их размеров, то ни форма, ни размеры заряженных тел существенно не влияют на взаимодействие между ними. В этом случае тела можно рассматривать как точечные. Вспомните, что и закон всемирного тяготения тоже сформулирован для точечных тел[2].

Рис. 94



Сила взаимодействия заряженных тел зависит от свойств среды между заряженными телами. Пока будем считать, что взаимодействие происходит в вакууме. Впрочем, опыт показывает,

[1] Первым установил этот закон английский ученый Кавендиш. Но своих работ по электричеству Кавендиш не публиковал. Около ста лет рукописи находились в архиве семьи Кавендиша, пока не были переданы для печати Максвеллу. Произошло это через много лет после того, как закон взаимодействия зарядов был установлен Кулоном.

[2] Зная закон взаимодействия точечных заряженных тел, можно вычислнть силу взаимодействия любых заряженных тел. Для этого тела нужно мысленно разбить на столь малые элементы, чтобы каждый из них можно было считать точечным. Складывая силы взаимодействия всех этих элементов друг с другом, можно вычислить результирующую силу взаимодействия тел.

Кулон Шарль Огюстен (1736—1806) — французский ученый, известный своими работами по электричеству и магнетизму и исследованием сил трения. Наряду с изучением взаимодействия заряженных тел Кулон исследовал также взаимодействие полюсов длинных магнитов.

что воздух очень мало влияет на силу взаимодействия заряженных тел: она оказывается почти такой же, как в вакууме.

Опыты Кулона. Открытие закона взаимодействия электрических зарядов облегчалось тем, что эти силы велики. Здесь не нужно было применять особо чувствительной аппаратуры, как при проверке закона всемирного тяготения в земных условиях. С помощью крутильных весов удалось установить, как взаимодействуют друг с другом неподвижные заряженные тела. Крутильные весы состоят из стеклянной палочки, подвешенной на тонкой упругой проволочке (рис. 94). На одном конце палочки закреплен маленький металлический шарик *a*, а на другом — противовес *c*. Еще один металлический шарик *b* закреплен на крышке весов неподвижно.

При сообщении шарикам одноименных зарядов они начинают отталкиваться друг от друга. Чтобы удержать шарики на фиксированном расстоянии, упругую проволочку нужно закрутить на некоторый угол. По углу закручивания проволоки определяют силу взаимодействия шариков.

Крутильные весы позволили изучить зависимость силы взаимодействия заряженных шариков от зарядов и от расстояния между ними. Измерять силу и расстояние в то время умели. Единственная трудность была с зарядом, для измерения которого не существовало даже единиц. Кулон нашел простой способ изменения заряда одного из шариков в 2, 4 и т. д. раз, соединяя его с таким же незаряженным шариком. Заряд при этом распределялся поровну между шариками, что и уменьшало исследуемый заряд в известном отношении. Новое значение силы при новом заряде определялось экспериментально.

Закон Кулона. Опыты Кулона привели к установлению закона, поразительно напоминающего закон всемирного тяготения.

Сила взаимодействия двух точечных неподвижных заряженных тел в вакууме прямо пропорциональна произведению модулей зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними[1]. Эту силу называют кулоновской.

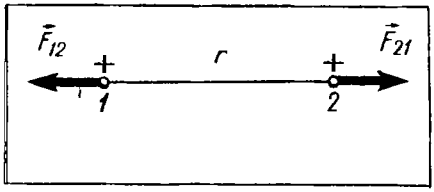


Рис. 95

Если обозначить модули зарядов через $|q_1|$ и $|q_2|$, а расстояние между ними — через r, то закон Кулона можно записать в следующей форме:

$$F = k\frac{|q_1||q_2|}{r^2}. \qquad (8.2)$$

где k — коэффициент пропорциональности, численно равный силе взаимодействия единичных зарядов на расстоянии, равном единице длины.

Такую же форму (8.2) имеет закон всемирного тяготения: вместо зарядов в формулу закона тяготения входят массы, а роль коэффициента k играет гравитационная постоянная.

Пока еще ничего не было сказано о направлении сил взаимодействия между зарядами. Легко обнаружить, что два заряженных шарика, подвешенных на нитях, либо притягиваются друг к другу, либо отталкиваются. Отсюда следует, что **силы взаимодействия двух неподвижных точечных заряженных тел направлены вдоль прямой, соединяющей эти тела** (рис. 95). Подобные силы называют центральными. В соответствии с третьим законом Ньютона $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$.

Открытие закона Кулона — первый конкретный шаг в изучении свойств электрического заряда. Наличие электрического заряда у тел или элементарных частиц означает, что они взаимодействуют друг с другом по закону Кулона.

39. ЕДИНИЦА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА

Выбрать единицу электрического заряда, как и единицы других физических величин, можно произвольно. Дело здесь в целесообразности того или другого выбора.

Создать макроскопический эталон единицы электрического заряда, подобный эталону длины — метру, невозможно из-за неизбежной утечки заряда. Естественно было бы за единицу принять заряд электрона (это сейчас и сделано в атомной фи-

[1] Здесь и в дальнейшем часто для краткости мы вместо «модуля силы» будем говорить просто о силе.

зике). Но во времена Кулона еще не было известно о существовании в природе электрона. Заряд электрона слишком мал, и поэтому пользоваться им в качестве единицы заряда не всегда удобно.

Единица заряда — кулон. В Международной системе единиц (СИ) единица заряда является не основной, а производной и эталон для нее не вводится. Наряду с метром, секундой и килограммом в СИ введена одна основная единица для измерения электрических величин — единица силы тока — ампер. Эталонное значение ампера устанавливается с помощью магнитных взаимодействий токов. Об этом было сказано в учебнике физики для VII класса.

Единицу заряда в СИ — кулон — устанавливают с помощью единицы силы тока. **1 кулон (Кл) — это заряд, проходящий за 1 с через поперечное сечение проводника при силе тока 1 А.**

Коэффициент k в законе Кулона при записи его в единицах СИ имеет наименование $\frac{\text{Н}\cdot\text{м}^2}{\text{Кл}^2}$, так как согласно (8.2)

$$k=\frac{Fr^2}{|q_1||q_2|}, \tag{8.3}$$

а сила измеряется в ньютонах, расстояние — в метрах и заряд — в кулонах. Численное значение этого коэффициента можно определить экспериментально. Для этого достаточно измерить силу взаимодействия между двумя известными зарядами, находящимися на заданном расстоянии, и подставить значения F, r, $|q_1|$ и $|q_2|$ в формулу (8.3). Полученное значение k таково:

$$k=9\cdot 10^9\,\frac{\text{Н}\cdot\text{м}^2}{\text{Кл}^2}. \tag{8.4}$$

Заряд в 1 Кл очень велик. Сила взаимодействия двух точечных зарядов по 1 Кл каждый, расположенных на расстоянии 1 км друг от друга, чуть меньше силы, с которой земной шар притягивает груз массой 1 т. Поэтому сообщить небольшому телу (размером порядка нескольких метров) заряд 1 Кл невозможно. Отталкиваясь друг от друга, заряженные частицы не могут удержаться на теле. Никаких других сил, которые были бы способны в данных условиях компенсировать кулоновское отталкивание, в природе не существует. Но в проводнике, который в целом нейтрален, привести в движение заряд 1 Кл не составляет большого труда. Ведь в обычной электрической лампе мощностью 100 Вт при напряжении 127 В устанавливается ток, немного меньший 1 А. При этом за 1 с через поперечное сечение проводника проходит заряд, почти равный 1 Кл.

Минимальный заряд, существующий в природе, — это заряд элементарных частиц. В единицах СИ модуль этого заряда равен:

$$\boxed{e=1{,}6\cdot 10^{-19}\ \text{Кл}}. \tag{8.5}$$

Электрическая постоянная. Коэффициент k в СИ принято записывать в форме:

$$k=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}. \qquad (8.6)$$

Величину ε_0 (ε — греческая буква; читается «эпсилон») называют электрической постоянной. Она равна:

$$\varepsilon_0=\frac{1}{4\pi k}=8{,}85\cdot10^{-12}\frac{\text{Кл}^2}{\text{Н}\cdot\text{м}^2}. \qquad (8.7)$$

Мы в дальнейшем для простоты записи формул будем почти всегда оставлять в них коэффициент k, не прибегая к его выражению (8.6).

1. В чем сходство и различие закона всемирного тяготения и закона Кулона? 2. Как определяется единица заряда в СИ? 3. Запишите закон Кулона. 4. Чему равен коэффициент k в законе Кулона? 5. Чему равен заряд электрона?

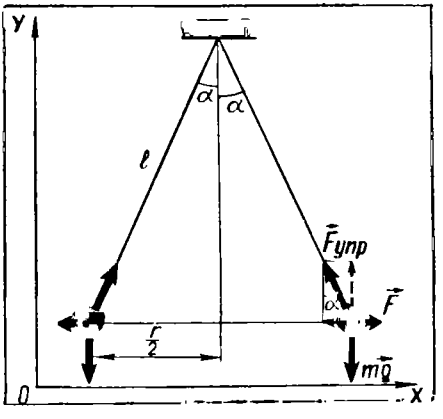
ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

При решении задач на применение закона Кулона используются те же приемы, что и при решении задач на статику в курсе механики VIII класса. Надо лишь иметь в виду, что направление кулоновской силы зависит от знаков зарядов взаимодействующих тел. Кроме того, в ряде задач используется закон сохранения заряда и тот факт, что минимальная порция электрического заряда — модуль заряда элементарной частицы — равен $1{,}6\cdot10^{-19}$ Кл.

1. Сколько электронов содержится в капле воды массой $m=0{,}03$ г? Масса молекулы воды $m_0=3\cdot10^{-23}$ г.

Решение. Молекула воды H_2O содержит 10 электронов. В капле воды содержится $\frac{m}{m_0}=10^{21}$ молекул и, следовательно, 10^{22} электронов.

Рис. 96



2. Два одинаковых шарика подвешены на нитях длиной $l=2$ м к одной точке. Когда шарикам сообщили одинаковые заряды по $q=2\cdot10^{-8}$ Кл, они разошлись на расстояние $r=16$ см. Определить натяжение каждой нити.

Решение. На каждый шарик действуют три силы: сила тяжести $m\vec{g}$, сила упругости нити $\vec{F}_{упр}$ и кулоновская сила $\vec{F}$ (рис. 96).

Шарик неподвижен; следовательно, сумма проекций сил на оси Ox и Oy равна нулю. Для суммы проекций сил на ось Ox это условие имеет вид: $F - F_{упр}\sin\alpha + mg\cos 90° = 0$.

Так как $\sin\alpha = \frac{r}{2l}$ и $F = k\frac{q^2}{r^2}$, то $F_{упр} = \frac{F}{\sin\alpha} = \frac{F \cdot 2l}{r} = k\frac{q^2 \cdot 2l}{r^3}$;

$F_{упр} \approx 3{,}5 \cdot 10^{-3}$ Н.

Нить натянута с силой, приближенно равной $3{,}5 \cdot 10^{-3}$ Н.

3. Небольшие заряженные тела расположены на одной прямой. Тело с зарядом $q_2 = 1{,}0 \cdot 10^{-8}$ Кл расположено между телом с зарядом $q_1 = -3{,}0 \cdot 10^{-8}$ Кл (на расстоянии $r_{12} = 0{,}4$ м от него) и телом с зарядом $q_3 = 5{,}0 \cdot 10^{-8}$ Кл (на расстоянии $r_{23} = 0{,}6$ м от последнего). Найти результирующие кулоновских сил, приложенных к каждому телу.

Решение. Первое и второе тела притягиваются по закону Кулона с силой

$$F_{12} = k\frac{|q_1||q_2|}{r_{12}^2}.$$

Второе и третье тела отталкиваются с силой, модуль которой равен:

$$F_{23} = k\frac{|q_2||q_3|}{r_{23}^2}.$$

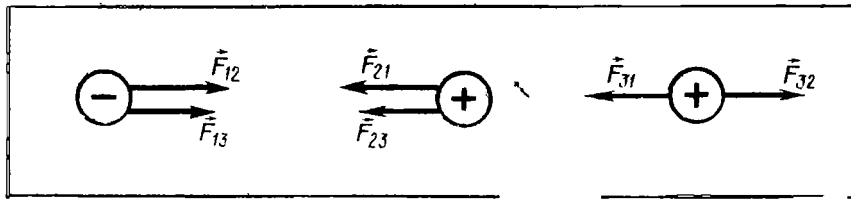
Первое и третье тела притягиваются с силой, модуль которой равен:

$$F_{31} = k\frac{|q_1||q_3|}{(r_{12} + r_{23})^2}.$$

Рассмотрим кулоновские силы, действующие на первое тело (рис. 97). Они направлены в одну сторону. Следовательно, модуль результирующей силы равен сумме их модулей:

$$F_1 = F_{12} + F_{13} = k|q_1|\left(\frac{|q_2|}{r_{12}^2} + \frac{|q_3|}{r_{13}^2}\right); \quad F_1 \approx 30{,}1 \cdot 10^{-6} \text{ Н}.$$

Рис. 97



Кулоновские силы, приложенные ко второму телу, также направлены в одну сторону (рис. 97), поэтому модуль результирующей силы составляет:

$$F_2 = F_{12} + F_{23} = k|q_2|\left(\frac{|q_1|}{r_{12}^2} + \frac{|q_3|}{r_{23}^2}\right); \quad F_2 \approx 2{,}94 \cdot 10^{-6} \text{ Н}.$$

Силы, приложенные к третьему телу, направлены в противоположные стороны (рис. 97). Сила притяжения F_{31} со стороны первого тела больше силы отталкивания F_{32} со стороны второго тела. Модуль результирующей равен разности сил. Результирующая сила направлена в сторону большей силы:

$$F_3 = F_{13} - F_{23} = k|q_3|\left[\frac{|q_1|}{(r_{12}+r_{23})^2} - \frac{|q_2|}{r_{23}^2}\right]; \quad F_3 \approx 1{,}1 \cdot 10^{-6} \text{ Н}.$$

Упр. 8

1. Известно, что стеклянная палочка, потертая о шелк, заряжается положительно. Определить экспериментально знак заряда пластмассовой ручки, потертой о шерсть.

2. Электризация тел, правда незначительная, возникает при тесном контакте тел без трения. Означает ли это, что можно получить два заряженных тела, не совершая работы?

3. Определить силу взаимодействия электрона с ядром в атоме водорода, если расстояние между ними равно $0{,}5 \cdot 10^{-8}$ см.

4. Во сколько раз кулоновская сила взаимодействия электрона с ядром в атоме водорода больше силы их гравитационного взаимодействия? Масса электрона $m_e = 9{,}11 \cdot 10^{-31}$ кг, а масса протона $m_p = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ кг. Гравитационная постоянная $G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}$ Н·м^2/кг^2.

5. С какой силой взаимодействовали бы две капли воды на расстоянии 1 км, если бы удалось передать одной из капель 1% всех электронов, содержащихся в другой капле массой 0,03 г?

6. Два одинаковых шарика находятся на расстоянии 40 см друг от друга. Заряд одного из них $9 \cdot 10^{-9}$ Кл, а заряд другого $-2 \cdot 10^{-9}$ Кл. Шарики привели в соприкосновение и вновь раздвинули на такое же расстояние. Найти силы их взаимодействия до и после соприкосновения.

7. Точечные заряды $1{,}0 \cdot 10^{-8}$ и $2{,}0 \cdot 10^{-8}$ Кл закреплены на расстоянии 1 м друг от друга в вакууме. На прямой, соединяющей заряды, на одинаковом расстоянии от каждого из них помещено маленькое тело, несущее заряд $-3 \cdot 10^{-9}$ Кл. Каковы модуль и направление силы, действующей на тело?

40. БЛИЗКОДЕЙСТВИЕ И ДЕЙСТВИЕ НА РАССТОЯНИИ

Близкодействие. Закон взаимодействия неподвижных электрических зарядов был установлен экспериментально. Но оставался нерешенным вопрос, как осуществляется это взаимодействие.

Если мы наблюдаем действие одного тела на другое, находящееся на некотором расстоянии от него, то, прежде чем допустить, что это действие прямое и непосредственное, мы склонны

сначала исследовать, нет ли между телами какой-либо материальной связи: нитей, стержней и т. д. Если подобные связи есть, то мы объясняем действие одного тела на другое при помощи этих промежуточных звеньев. Так, когда водитель уже редко встречающихся ныне старых автобусов поворачивает рукоятку, открывающую дверь, то последовательные участки соединительного стержня сжимаются, затем приходят в движение, пока дверь не откроется. В современных автобусах водитель заставляет дверь открываться, направляя по трубкам сжатый воздух в цилиндр, управляющий механизмом двери. Можно приспособить для этой цели электромагнит, посылая к нему ток по проводам.

Во всех трех способах открывания двери есть нечто общее: между водителем и дверью существует непрерывная соединительная линия, в каждой точке которой совершается некоторый физический процесс. С помощью этого процесса, распространяющегося от точки к точке, происходит передача действия, причем не мгновенно, а с той или иной скоростью.

Итак, действие между телами на расстоянии во многих случаях можно объяснить присутствием передающих действие промежуточных звеньев. Не разумно ли и в тех случаях, когда никакой среды, никакого посредника между взаимодействующими телами мы не замечаем, допустить существование некоторых промежуточных звеньев? Ведь иначе придется считать, что тело действует там, где его нет.

Кому не знакомы свойства воздуха, тот может подумать, что рот или голосовые связки собеседника непосредственно действуют на уши, и считать передачу звука невидимой средой чем-то совершенно непонятным. Однако можно проследить весь процесс распространения звуковых волн и вычислить их скорость.

Предположение о том, что взаимодействие между удаленными друг от друга телами всегда осуществляется с помощью промежуточных звеньев (или среды), передающих взаимодействие от точки к точке, составляет сущность теории близкодействия.

Многие ученые, сторонники теории близкодействия, для объяснения происхождения гравитационных и электромагнитных сил придумывали невидимые истечения, окружающие планеты и магниты, незримые атмосферы вокруг наэлектризованных тел. Размышления эти были подчас весьма остроумны, но ничего не давали науке.

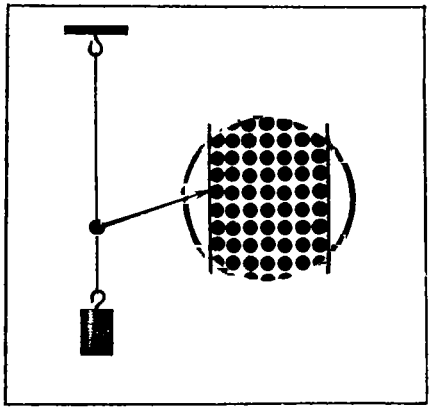
Действие на расстоянии. Так продолжалось до тех пор, пока Ньютон не установил закон всемирного тяготения, не предложив, однако, какого-либо объяснения его действия. Последовавшие за этим успехи в исследовании Солнечной системы настолько захватили воображение ученых, что они вообще в большинстве своем начали склоняться к мысли, что поиски каких-либо посредников, передающих взаимодействие от одного тела к другому, совсем не нужны.

Возникла теория прямого действия на расстоянии непосредственно через пустоту. Согласно этой теории действие передается мгновенно на сколь угодно большие расстояния. Тела способны «чувствовать» присутствие друг друга без какой-либо среды между ними. Сторонников действия на расстоянии не смущала мысль о действии тела там, где его самого нет. «Разве,— рассуждали они, — мы не видим, как магнит или наэлектризованная палочка прямо через пустоту притягивают тела?» И при этом сила притяжения, например, магнита заметно не меняется, если магнит завернуть в бумагу или положить в деревянный ящик. Более того, даже если нам и кажется, что взаимодействие тел вызвано непосредственным контактом, то в действительности это не так. При самом тесном контакте между телами или частями одного тела остаются небольшие промежутки. Ведь груз, например, подвешенный на нити, не разрывает эту нить, хотя между отдельными атомами, из которых она состоит, ничего нет (рис. 98). Действие на расстоянии — единственный способ действия, встречающийся повсюду.

Возражения против теории близкодействия были довольно сильными, тем более что они подкреплялись успехами, которых добились такие убежденные сторонники действия на расстоянии, как Кулон и Ампер, открывшие законы взаимодействия зарядов и токов.

Если бы развитие науки происходило прямолинейно, то, казалось бы, победа теории действия на расстоянии обеспечена. Но в действительности развитие науки напоминает скорее винтовую линию. Пройдя один виток, наука возвращается примерно к тем же представлениям, но уже на более высоком уровне. Именно так произошло при развитии молекулярно-кинетической теории. Атомная гипотеза Демокрита одно время была оставлена большинством ученых. Затем она возродилась в строгой математической форме и была доказана экспериментально. Так же случилось и при развитии теории близкодействия.

Рис. 98



Успехи в открытии законов взаимодействия электрических зарядов и токов не были неразрывно связаны с представлением о действии на расстоянии. Ведь опытное исследование самих сил не предполагает определенных представлений о том, как эти силы передаются. В первую очередь нужно было найти математическое выражение сил, а выяснить их природу можно было и потом.

41. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Идеи Фарадея. Решительный поворот к представлениям близкодействия был начат великим английским ученым Майклом Фарадеем, а окончательно завершен Максвеллом.

По теории действия на расстоянии один заряд непосредственно «чувствует» присутствие другого. При перемещении одного из зарядов A (рис. 99) сила, действующая на другой заряд B, мгновенно изменяет свое значение. Причем ни с самим зарядом B, ни с окружающим его пространством никаких изменений не происходит.

Согласно идее Фарадея *электрические заряды не действуют друг на друга непосредственно. Каждый из них создает в окружающем пространстве электрическое поле. Поле одного заряда действует на другой заряд, и наоборот.* По мере удаления от заряда поле ослабевает.

Первоначально эта идея выражала лишь уверенность Фарадея в том, что действие одного тела на другое через пустоту невозможно.

Доказательств существования поля не было. Такие доказательства и нельзя получить, исследуя лишь взаимодействие неподвижных зарядов. Успех к теории близкодействия пришел после изучения электромагнитных взаимодействий движущихся заряженных частиц. Вначале было доказано существование переменных во времени полей, и только после этого был сделан вывод о реальности электрического поля неподвижных зарядов.

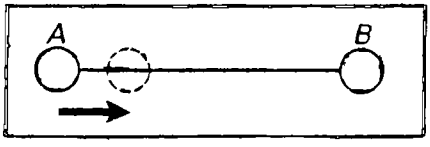
Скорость распространения электромагнитных взаимодействий. Основываясь на идеях Фарадея, Максвелл сумел теоретически доказать, что электромагнитные взаимодействия должны распространяться в пространстве с конечной скоростью.

Это означает, что если слегка передвинуть заряд A (рис. 99), то сила, действующая на заряд B, изменится, но не в то же мгновение, а лишь спустя время:

$$t=\frac{|AB|}{c}, \qquad (8.8)$$

где $|AB|$ — расстояние между зарядами, а c — скорость распространения электромагнитных взаимодействий. Максвелл нашел, что она равна скорости света в вакууме, т. е. 300 000 км/с. При перемещении заряда A электрическое поле вокруг заряда B изменится спустя время t.

Рис. 99



Значит, между зарядами в вакууме происходит какой-то процесс, в результате которого взаимодействие между ними распространяется с конечной скоростью.

Существование опре-

Фарадей Майкл (1791—1867) — великий английский ученый, творец общего учения об электромагнитных явлениях, в котором все явления рассматриваются с единой точки зрения. Фарадей впервые ввел представление об электрическом и магнитном полях. «Там, где математики видели центры напряжения сил дальнодействия, Фарадей видел промежуточный агент. Где они не видели ничего, кроме расстояния, удовлетворясь тем, что находили закон распределения сил, действующих на электрические флюиды (т. е. заряды с современной точки зрения), Фарадей искал сущность реальных явлении, протекающих в среде» (Д. Максвелл).

деленного процесса в пространстве между взаимодействующими телами, длящегося конечное время,— вот главное, что отличает теорию близкодействия от теории действия на расстоянии. Все прочие аргументы в пользу той или другой теории не могут считаться решающими. Правда, эксперимент по проверке равенства (8.8) при перемещении зарядов трудно осуществить из-за большого значения скорости c. Но в этом сейчас, после изобретения радио, нет нужды.

Радиоволны. Передача информации с помощью электромагнитных волн называется радиосвязью. Сейчас вы можете просто прочитать в газетах, что радиоволны от космической станции, приближающейся к Венере, доходят до Земли более чем через четыре минуты. Станция уже может сгореть в атмосфере планеты, а посланные ею радиоволны еще долго будут блуждать в пространстве. Таким образом, электромагнитное поле обнаруживает себя как нечто реально существующее.

Что такое электрическое поле? Мы знаем, что электрическое поле существует реально. Мы можем исследовать его свойства опытным путем. Но мы не можем сказать, из чего это поле состоит. Здесь мы доходим до границы того, что сейчас известно науке.

Дом состоит из кирпичей, плит и т. д. Последние, в свою очередь,— из молекул, а молекулы — из атомов. Атомы - из элементарных частиц. Более же простых образований, чем элементарные частицы, мы, по крайней мере сейчас, не знаем. Так же обстоит дело с электрическим полем. Ничего более простого, чем поле, мы не знаем. Поэтому о природе электрического поля мы можем сказать лишь следующее:

во-первых, **поле материально: оно существует независимо от нас, от наших знаний о нем;**

во-вторых, **оно обладает определенными свойствами,** которые не позволяют спутать его с чем-либо другим в окружающем мире. Установление этих свойств и формирует наши представления о том, что такое электрическое поле.

При изучении электрического поля мы сталкиваемся с особым видом материи, движение которой не подчиняется законам механики Ньютона. С открытием электрического поля впервые за всю историю науки появилась глубокая идея: *существуют различные виды материи и каждому из них присущи свои законы.*

Основные свойства электрического поля. Главное свойство электрического поля — действие его на электрические заряды с некоторой силой. По действию на заряд устанавливают существование поля, распределение его в пространстве, изучают все его характеристики.

Электрическое поле неподвижных зарядов называют электростатическим. Оно не меняется со временем. *Электростатическое поле создается только электрическими зарядами.* Оно существует в пространстве, окружающем эти заряды, и неразрывно с ними связано.

По мере изучения электродинамики мы будем знакомиться с новыми свойствами поля. Познакомимся и с переменным во времени электрическим полем, которое уже не связано с зарядами неразрывно. Многие свойства статических и переменных полей совпадают. Однако имеются между ними и существенные различия. Говоря о свойствах поля, мы будем называть это поле просто электрическим, если данное свойство в равной мере присуще как статическим, так и переменным полям.

42. НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ. ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ ПОЛЕЙ

Напряженность электрического поля. Электрическое поле обнаруживается по силам, действующим на заряд. Можно утверждать, что мы знаем о поле все, что нам нужно, если будем знать силу, действующую на любой заряд в любой точке поля.

Если поочередно помещать в одну и ту же точку поля небольшие заряженные тела и измерять силы, то обнаружится, что сила, действующая на заряд со стороны поля, прямо пропорциональна этому заряду. Действительно, пусть поле создается точечным зарядом q_1. Согласно закону Кулона (8.2) на заряд q_2 действует сила, пропорциональная заряду q_2. Поэтому *отношение силы, действующей на помещаемый в данную точку поля заряд, к этому заряду для каждой точки поля не зависит от заряда и может рассматриваться как характеристика поля.* Эту характеристику называют напряженностью электрического поля. Подобно силе, напряженность поля — векторная

величина. Ее обозначают буквой $\vec{E}$. Если помещенный в поле заряд обозначить через q вместо q_2, то, по определению, напряженность равна:

$$\vec{E}=\frac{\vec{F}}{q}. \tag{8.9}$$

Напряженность поля равна отношению силы, с которой поле действует на точечный заряд, к этому заряду.

Отсюда сила, действующая на заряд q со стороны электрического поля, равна:

$$\boxed{\vec{F}=q\vec{E}.} \tag{8.10}$$

Направление вектора $\vec{E}$ совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд, и противоположно направлению силы, действующей на отрицательный заряд.

Согласно формуле (8.9) напряженность поля в единицах СИ можно выразить в ньютонах на кулон (Н/Кл).

Напряженность поля точечного заряда. Найдем напряженность электрического поля, создаваемого точечным зарядом q_0. По закону Кулона этот заряд будет действовать на другой заряд q с силой, равной:

$$F=k\frac{|q||q_0|}{r^2}.$$

Модуль напряженности поля точечного заряда q_0 на расстоянии r от него равен:

$$E=\frac{F}{q}=k\frac{|q_0|}{r^2}. \tag{8.11}$$

Вектор напряженности в любой точке электрического поля направлен вдоль прямой, соединяющей эту точку и заряд, от заряда, если $q_0>0$, и к заряду, если $q_0<0$ (рис. 100).

Принцип суперпозиции полей. Если на тело действуют несколько сил, то согласно законам механики результирующая сила равна геометрической сумме сил: $\vec{F}=\vec{F}_1+\vec{F}_2+\ldots$

Рис. 100

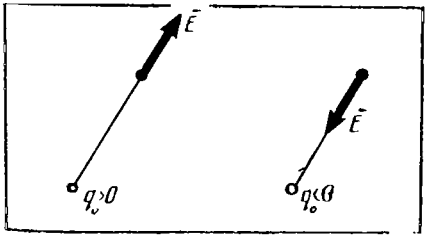
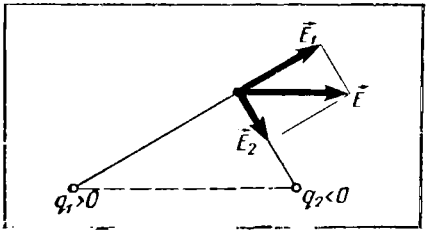


Рис. 101



На электрические заряды действуют силы со стороны электрического поля. Если при наложении полей от нескольких зарядов эти поля не оказывают никакого влияния друг на друга, то результирующая сила со стороны всех полей должна быть равна геометрической сумме сил со стороны каждого поля. Именно так и происходит на самом деле. Это означает, что напряженности полей складываются геометрически, так как согласно (8.9) напряженности прямо пропорциональны силам.

В этом состоит *принцип суперпозиции полей*[1]. Принцип суперпозиции формулируется так: **если в данной точке пространства различные заряженные частицы создают электрические поля, напряженности которых $\vec{E}_1$, $\vec{E}_2$, $\vec{E}_3$ и т. д., то результирующая напряженность поля в этой точке равна:**

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \ldots . \qquad (8.12)$$

Благодаря принципу суперпозиции для нахождения напряженности поля системы заряженных частиц в любой точке достаточно знать выражение (8.11) для напряженности поля точечного заряда. На рисунке 101 показано, как определяется напряженность поля $\vec{E}$, созданная двумя точечными зарядами: q_1 и q_2.

43. СИЛОВЫЕ ЛИНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Мы получим некоторое представление о распределении поля, если нарисуем векторы напряженности поля в нескольких точках пространства (рис. 102). Картина будет более наглядной, если нарисовать **непрерывные линии, касательные к которым в каждой**

[1] «Суперпозиция» в переводе на русский означает «наложение».

Рис. 102

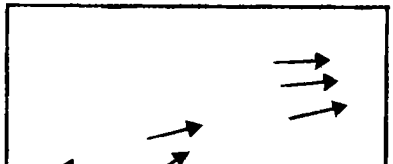
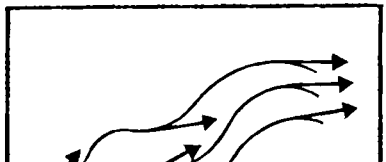


Рис. 103



точке, через которую они проходят, совпадают с вектором напряженности. Эти линии называют силовыми линиями электрического поля или линиями напряженности (рис. 103).

Не следует думать, что линии напряженности — это существующие в действительности образования вроде растянутых упругих нитей или шнуров, как предполагал сам Фарадей. Они лишь помогают наглядно представить распределение поля в пространстве и не более реальны, чем меридианы и параллели на земном шаре.

Однако силовые линии можно сделать «видимыми». Если продолговатые кристаллики изолятора (например, хинина — лекарства от малярии) хорошо перемешать в вязкой жидкости (например, в касторовом масле) и поместить туда заряженные тела, то вблизи этих тел кристаллики «выстроятся» в цепочки вдоль линий напряженности.

На рисунках приведены примеры линий напряженности: положительно заряженного шарика (рис. 104); двух разноименно заряженных шариков (рис. 105); двух одноименно заряженных шариков (рис. 106); двух пластин, заряды которых равны по модулю и противоположны по знаку (рис. 107). Последний пример особенно важен. На рисунке 107 видно, что в пространстве между пластинами вдали от краев пластин силовые линии параллельны: электрическое поле здесь одинаково во всех точках.

Электрическое поле, напря-

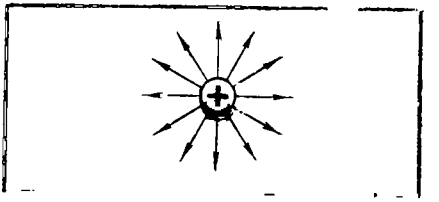


Рис. 104

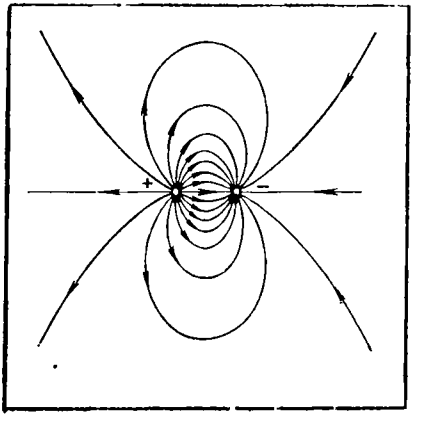


Рис. 105

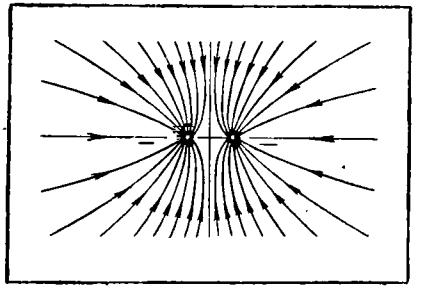
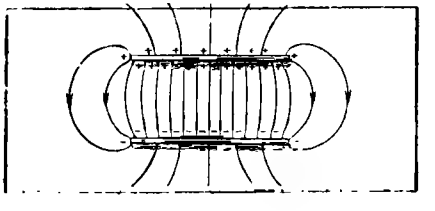


Рис. 106

Рис. 107



женность которого одинакова во всех точках пространства, называется однородным. В ограниченной области пространства электрическое поле можно считать приблизительно однородным, если напряженность поля внутри этой области меняется незначительно.

Силовые линии электрического поля не замкнуты; они начинаются на положительных зарядах и оканчиваются на отрицательных[1]. Линии непрерывны и не пересекаются, так как их пересечение означало бы отсутствие определенного направления напряженности электрического поля в данной точке. Так как силовые линии начинаются или оканчиваются на заряженных телах, а затем расходятся в разные стороны (рис. 104), то *густота линий больше вблизи заряженных тел, где напряженность поля также больше.*

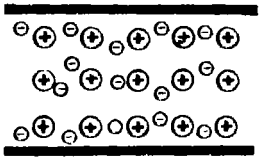
? **1. В чем состоит отличие теории близкодействия от теории действия на расстоянии? 2. Перечислите основные свойства электростатического поля. 3. Что называют напряженностью электрического поля? 4. Чему равна напряженность поля точечного заряда? 5. Сформулируйте принцип суперпозиции. 6. Что называют силовыми линиями электрического поля? 7. Нарисуйте силовые линии однородного электрического поля.**

44. ПРОВОДНИКИ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Свободные заряды. В проводниках, к которым в первую очередь относятся металлы, имеются заряженные частицы, способные перемещаться внутри проводника под влиянием электрического поля. По этой причине заряды этих частиц называют свободными зарядами.

В металлах носителями свободных зарядов являются электроны. При образовании металла из нейтральных атомов атомы начинают взаимодействовать друг с другом. Благодаря этому взаимодействию электроны внешних оболочек атомов полностью утрачивают связи со «своими» атомами и становятся «собственностью» всего проводника в целом. В результате положительно заряженные ионы оказываются окруженными отрицательно заряженным «газом», образованным коллективизированными электронами (рис. 108). Свободные электроны участвуют в тепловом движении, подобно молекулам газа, и могут перемещаться по куску металла в любом направлении.

Рис. 108



Электростатическое поле внутри проводника. Наличие в проводнике свободных зарядов приводит к тому, что внутри проводника электростатическое поле равно нулю. Если бы напряженность электрического поля была отлична от нуля,

[1] Силовые линии, изображенные на рисунке 104, также оканчиваются на отрицательных зарядах, расположенных где то вдали.

то поле приводило бы свободные заряды в упорядоченное движение, т. е. в проводнике существовал бы электрический ток. Утверждение об отсутствии электрического поля внутри проводника в равной мере справедливо как для заряженного проводника, так и для незаряженного, помещенного во внешнее электростатическое поле[1].

На примере незаряженной пластины, внесенной в однородное поле (рис. 109), выясним, в результате какого процесса напряженность электростатического поля внутри проводника оказывается равной нулю. Под действием электрического поля электроны пластины начинают перемещаться справа налево. В первый момент (при внесении проводника в поле) возникает электрический ток. Левая часть пластины заряжается отрицательно, а правая — положительно. В этом состоит явление электростатической индукции. (Если разделить пластину пополам вдоль линии MN, то обе половины окажутся заряженными.) Появившиеся заряды создают свое поле (линии напряженности этого поля показаны на рисунке 110 пунктирными прямыми), которое накладывается на внешнее поле и компенсирует его. За ничтожно малое время заряды перераспределяются так, что напряженность результирующего поля внутри пластины становится равной нулю и движение зарядов прекращается. В противном случае в проводнике все время протекал бы ток и выделялась теплота. Но согласно закону сохранения энергии это невозможно.

Итак, электростатического поля внутри проводника нет. На этом основана так называемая электростатическая

[1] Конечно, отдельные заряженные частицы — электроны и ионы — создают микроскопические поля. Но эти поля взаимно компенсируют друг друга, и среднее значение напряженности их поля оказывается равным нулю.

Рис. 109

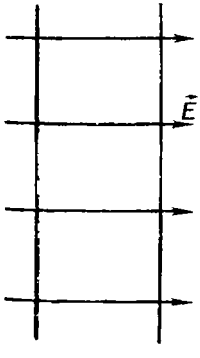


Рис. 110

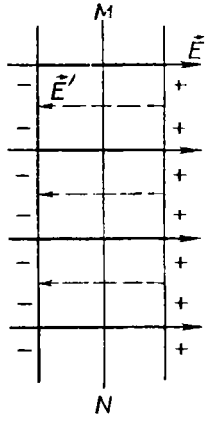
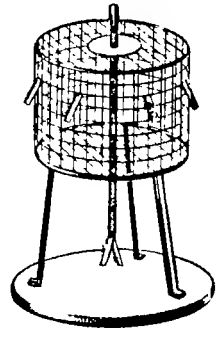


Рис. 111



защита. Чтобы защитить чувствительные к электрическому полю приборы, их заключают в металлические ящики.

Силовые линии электростатического поля вне проводника перпендикулярны его поверхности. Если бы это было не так, то имелась бы составляющая напряженности поля вдоль поверхности проводника и по поверхности протекал бы электрический ток.

Электрический заряд проводников. В случае равновесия зарядов не только напряженность поля внутри проводника равна нулю, равен нулю и заряд. *Весь статический заряд проводника сосредоточен на его поверхности.* В самом деле, если бы внутри проводника имелся заряд, то вблизи заряда имелось бы и поле. Но электростатического поля внутри проводника нет. Следовательно, заряды в проводнике могут располагаться только на его поверхности.

Отсутствие заряда внутри проводника можно обнаружить с помощью простых опытов, например опыта с цилиндром из проволочной сетки (рис. 111). На поверхности цилиндра наклеены легкие листочки станиоля. Внутри цилиндра на проводящем подвижном стержне укреплены еще два листочка. Если сообщить цилиндру заряд, например, от электростатической машины, листочки отклоняются на некоторый угол, так как перетекший на них заряд будет отталкиваться от одноименного заряда цилиндра или соседнего листочка. Но если листочки на стержне ввести внутрь цилиндра, то они не отклонятся, так как заряд на них равен нулю.

45. НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ РАВНОМЕРНО ЗАРЯЖЕННОГО ПРОВОДЯЩЕГО ШАРА И БЕСКОНЕЧНОЙ ПЛОСКОСТИ

Определим напряженность электрического поля заряженных тел простой формы: шара и плоскости. Приблизительно сферическую форму имеют многие тела в природе и технике: атомные ядра, капли дождя, планеты и т. д. Плоские поверхности тоже встречаются нередко. Кроме того, небольшой участок любой поверхности можно приближенно считать плоским.

Поле шара. Рассмотрим заряженный проводящий шар радиусом R. Заряд q равномерно распределен по поверхности шара. Силовые линии электрического поля, как вытекает из соображений симметрии, направлены вдоль продолжений радиусов шара (рис. 112).

Обратите внимание: силовые линии вне шара распределены в пространстве точно так же, как и силовые линии точечного заряда (рис. 113). Если совпадают картины силовых линий, то можно ожидать, что совпадают и напряженности полей. Поэтому на расстоянии $r \geqslant R$ от центра шара напряженность поля

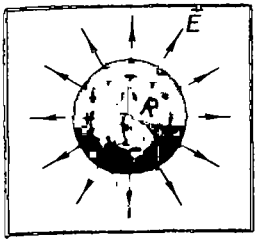


Рис. 112

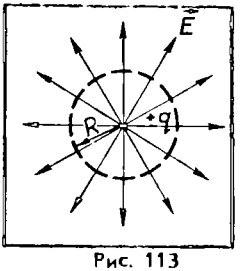


Рис. 113

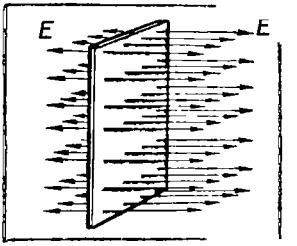


Рис. 114

определяется той же формулой (8.11), что и напряженность поля точечного заряда, помещенного в центре сферы:

$$E = k\frac{|q|}{r^2}. \qquad (8.13)$$

К этому результату приводят и строгие расчеты.

Внутри проводящего шара ($r < R$) напряженность поля равна нулю.

Поле плоскости. Распределение электрического заряда на поверхности заряженного тела характеризуется особой величиной — поверхностной плотностью заряда σ. Поверхностной плотностью заряда называют отношение заряда к площади поверхности, по которой он распределен. Если заряд q равномерно распределить по поверхности, площадь которой S, то

$$\sigma = \frac{q}{S}.$$

Наименование единицы поверхностной плотности заряда Кл/м^2.

Из соображений симметрии очевидно, что силовые линии электрического поля бесконечной равномерно заряженной плоскости представляют собой прямые, перпендикулярные плоскости (рис. 114). Поле бесконечной плоскости — однородное поле, т. е. во всех точках пространства, независимо от расстояния до плоскости, напряженность поля одна и та же. Она определяется поверхностной плотностью заряда σ.

Для нахождения зависимости напряженности поля от поверхностной плотности заряда σ можно использовать часто применяемый в физике метод, основанный на знании наименований физических величин. Единица напряженности электрического поля имеет наименование $\frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$, а единица поверхностной плотности заряда — $\frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}$.

Чтобы в этом случае получить правильное наименование единицы напряженности поля, мы должны допустить, что напря-

женность прямо пропорциональна произведению коэффициента k (см 8.11) на поверхностную плотность заряда σ: $E \sim k\sigma$. Коэффициент k имеет наименование $\frac{\text{Н}\cdot\text{м}^2}{\text{Кл}^2}$. Тогда наименование единицы напряженности будет $\frac{\text{Н}\cdot\text{м}^2}{\text{Кл}^2}\cdot\frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}=\frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$.

Коэффициент пропорциональности можно найти только с помощью вычислений. Эти вычисления приводят к следующему результату:

$$E = k2\pi|\sigma|. \qquad (8.14)$$

Бесконечных плоскостей не существует. Но если размеры плоскости велики по сравнению с расстоянием до нее от данной точки, то нормальная к плоскости составляющая напряженности поля в этой точке практически будет такой же, как и напряженность поля бесконечной плоскости.

46. ДИЭЛЕКТРИКИ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ. ДВА ВИДА ДИЭЛЕКТРИКОВ.

Изолятор, или диэлектрик[1], состоит из нейтральных в целом атомов или молекул. Электрические заряды (точнее, электрически заряженные частицы: электроны и ядра) в нейтральном атоме связаны друг с другом и не могут, подобно свободным зарядам проводника, перемещаться под действием поля по всему объему вещества.

Различие в строении проводников и диэлектриков приводит к тому, что они по-разному ведут себя в электростатическом поле.

[1] Изоляторы в физнке обычно называют диэлектриками, от греческого «диа» — через и английского «электрик» – электрический (термином «диэлектрики» обозначают вещества, через которые передаются электромагнитные взаимодействия).

Рис. 115

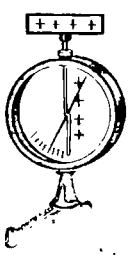
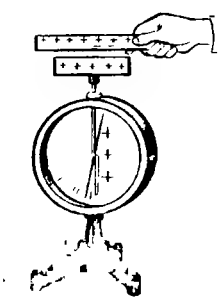


Рис. 116



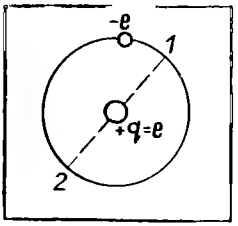


Рис. 117

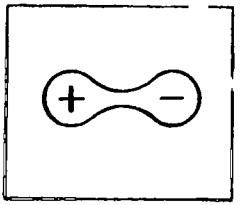


Рис. 118

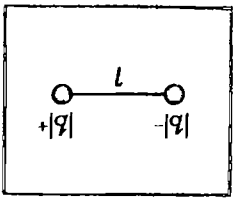


Рис. 119

Электростатическое поле может существовать внутри диэлектрика, и при этом диэлектрик оказывает на него определенное влияние.

С помощью простого опыта можно убедиться в том, что незаряженный диэлектрик может создавать электрическое поле. На рисунке 115 вы видите заряженный электрометр с металлическим диском на конце стержня. Если к диску такого электрометра поднести заряженный диэлектрик, например толстое стекло, то стрелка электрометра приблизится к стержню (рис. 116). Это может произойти только в том случае, если помещенный в электрическое поле заряженного диска диэлектрик сам создает электрическое поле. Это поле влияет на распределение заряда в стержне электрометра, уменьшая заряд стрелки и стержня и увеличивая соответственно заряд диска.

Электрические свойства нейтральных атомов и молекул. Чтобы понять, как незаряженный диэлектрик создает электрическое поле, надо сначала познакомиться с электрическими свойствами нейтральных атомов и молекул.

Атомы и молекулы состоят из положительно заряженных частиц — ядер — и отрицательно заряженных частиц — электронов. На рисунке 117 изображена схема простейшего атома — атома водорода. Положительный заряд атома, заряд его ядра, сосредоточен в центре атома. Электрон движется в атоме с большой скоростью. Один оборот вокруг ядра он делает за очень малое время, порядка 10^{-15} с. Поэтому, например, уже за 10^{-9} с он успевает совершить миллион оборотов и, следовательно, миллион раз побывать в двух любых точках *1* и *2*, расположенных симметрично относительно ядра. Это дает основание считать, что в среднем по времени центр распределения отрицательного заряда приходится на середину атома, т. е. совпадает с положительно заряженным ядром.

Однако так обстоит дело не всегда. Рассмотрим молекулу поваренной соли NaCl. Атом натрия имеет во внешней оболочке один валентный электрон, слабо связанный с атомом. У хлора семь валентных электронов. При образовании молекулы единственный валентный электрон натрия захватывается хлором. Оба нейтральных атома превращаются в систему из двух ионов с зарядами противоположных знаков (рис. 118). Положительный и

отрицательный заряды не распределены теперь симметрично по объему молекулы: центр распределения положительного заряда приходится на ион натрия, а отрицательного - на ион хлора.

Электрический диполь. На большом расстоянии от молекулы ее можно приближенно рассматривать как совокупность двух точечных зарядов, равных по модулю и противоположных по знаку, находящихся на некотором расстоянии l друг от друга (рис. 119). Такую нейтральную в целом систему зарядов называют электрическим диполем.

Два вида диэлектриков. Диэлектрики можно разбить на два вида:

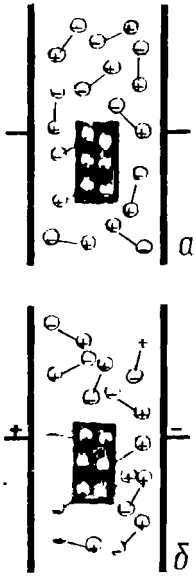
полярные, состоящие из молекул, у которых центры распределения положительных и отрицательных зарядов не совпадают, и

неполярные, состоящие из атомов или молекул, у которых центры распределения положительных и отрицательных зарядов совпадают. К полярным диэлектрикам относятся спирты, вода и др.; к неполярным — инертные газы, кислород, водород, бензол, полиэтилен и др.

47. ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ

Поляризация полярных диэлектриков. Полярный диэлектрик состоит из молекул, которые можно рассматривать как электрические диполи. Тепловое движение приводит к хаотической ориентации диполей (рис. 120, *а*). Из-за этого на поверхности диэлектрика, а также и в любом его объеме, содержащем большое число молекул (заштрихованный прямоугольник на рис. 120, *а*), электрический заряд в среднем равен нулю. Напряженность электрического поля в диэлектрике в среднем также равна нулю.

Рис. 120



Поместим диэлектрик между двумя параллельными металлическими пластинами, несущими заряды противоположного знака. Если размеры пластин много больше расстояния между ними, то поле между пластинами однородно (см. § 43). Со стороны этого поля на каждый электрический диполь будут действовать две силы, одинаковые по модулю и противоположные по направлению (рис. 121). Они создают момент силы, стремящейся повернуть диполь так, чтобы ось его была направлена по силовым линиям поля (рис. 122). Положительные заряды смещаются при этом в направлении электрического поля, а отрицательные — в противоположную сторону.

Рис. 121

Рис. 122

Смещение положительных и отрицательных связанных зарядов диэлектрика в противоположные стороны называют поляризацией.

Хаотическое тепловое движение препятствует созданию упорядоченной ориентации всех диполей. Только при температуре, равной абсолютному нулю, все диполи выстроились бы вдоль силовых линий. Таким образом, под влиянием поля происходит лишь частичная ориентация электрических диполей. Это означает, что в среднем число диполей, ориентированных вдоль поля, больше, чем число диполей, ориентированных против поля. На рисунке 120, *б* видно: у положительной пластины на поверхности диэлектрика появляются преимущественно отрицательные заряды диполей, а у отрицательно заряженной — положительные. В результате на поверхности диэлектрика возникает связанный заряд. Внутри диэлектрика положительные и отрицательные заряды диполей компенсируют друг друга и средний связанный электрический заряд по-прежнему равен нулю.

Поляризация неполярных диэлектриков. Неполярный диэлектрик в электрическом поле также поляризуется. Под действием поля положительные и отрицательные заряды молекулы смещаются в противоположные стороны и центры распределения положительного и отрицательного зарядов перестают совпадать, как и у полярной молекулы. Такие деформированные молекулы можно рассматривать как электрические диполи, оси которых направлены вдоль поля. На поверхностях диэлектрика, примыкающих к заряженным пластинам, появляются связанные заряды, как и при поляризации полярного диэлектрика.

Диэлектрическая проницаемость. Связанный заряд создает электрическое поле напряженности $\vec{E}_1$, направленной в диэлектрике против напряженности внешнего поля зарядов на пластинах (рис. 123). Из-за этого поле внутри диэлектрика ослабляется. Степень ослабления поля зависит от свойств диэлектрика.

Для характеристики электрических свойств диэлектриков вводится особая величина, называемая диэлектрической проницаемостью.

Диэлектрическая проницаемость среды — это физическая величина, показывающая, во сколько раз напряженность электрического поля E внутри однородного диэлектрика меньше напряженности поля E_0 в вакууме.

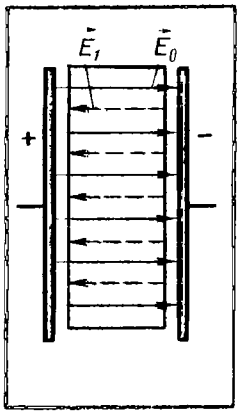


Рис. 123

Обозначив диэлектрическую проницаемость через ε, будем иметь: $\varepsilon = \frac{E_0}{E}$.

Соответственно напряженность электрического поля точечного заряда, заряженного шара и плоскости, помещенных в однородный диэлектрик, меньше в ε раз, чем в вакууме. Для точечного заряда и шара вместо (8.13) справедлива формула

$$E = k\frac{|q|}{\varepsilon r^2}. \qquad (8.15)$$

Для заряженной плоскости в однородном диэлектрике вместо (8.14) имеет место формула

$$E = k\frac{2\pi|\sigma|}{\varepsilon}. \qquad (8.16)$$

Сила взаимодействия точечных зарядов в однородном диэлектрике также убывает в ε раз за счет уменьшения напряженности поля. Закон Кулона для зарядов, помещенных в однородный диэлектрик, запишется в виде:

$$F = k\frac{|q_1||q_2|}{\varepsilon r^2}. \qquad (8.17)$$

Таким образом, силы взаимодействия между заряженными телами в отличие от сил всемирного тяготения зависят от свойств среды, в которой они находятся.

? **1. Чему равна напряженность поля внутри проводника в случае равновесия зарядов? 2. Как распределяется по проводнику сообщенный ему заряд? 3. Чему равна напряженность поля заряженного проводящего шара? 4. Чему равна напряженность поля равномерно заряженной плоскости? 5. Какие диэлектрики называют полярными и какие — неполярными? 6. Что называют поляризацией диэлектрика? 7. Что называют диэлектрической проницаемостью?**

48. ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ ЗАРЯЖЕННОГО ТЕЛА В ОДНОРОДНОМ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Электрическая энергия Из курса механики известно, что тела, взаимодействующие посредством гравитационных сил, обладают потенциальной энергией. Закон Кулона для взаимодействия электрически заряженных тел имеет такую же математическую форму, что и закон всемирного тяготения. Отсюда можно сделать вывод, что система заряженных тел также обладает потенциальной энергией. Это означает, что система заряженных тел способна совершить определенную работу. Напри-

мер, такая работа совершается при отталкивании заряженных листочков электроскопа друг от друга

Потенциальную энергию заряженных тел называют электрической или кулоновской.

Энергия взаимодействия электронов с ядром в атоме и энергия взаимодействия атомов друг с другом в молекулах (химическая энергия) — это в основном электрическая энергия. Огромная электрическая энергия запасена внутри атомного ядра. Именно за счет этой энергии выделяется теплота при работе ядерного реактора атомной электростанции.

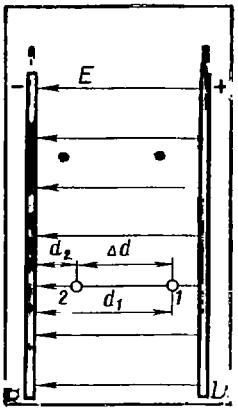


Рис. 124

С точки зрения теории близкодействия на заряд непосредственно действуют не другие заряды, а созданное ими электрическое поле. При перемещении заряда именно действующая на него со стороны поля сила совершает работу. (В дальнейшем для краткости мы будем говорить о работе поля.) Поэтому можно говорить не только об энергии системы заряженных частиц, но и о потенциальной энергии отдельного заряженного тела в электрическом поле.

Найдем потенциальную энергию заряда в однородном электрическом поле.

Работа при перемещении заряда в однородном поле. Однородное поле создают, например, большие металлические пластины, имеющие заряды противоположного знака. Это поле действует на заряд q с постоянной силой $\vec{F}=q\vec{E}$, подобно тому как Земля действует с постоянной силой $\vec{F}=m\vec{g}$ на камень вблизи ее поверхности. Пусть пластины расположены вертикально (рис. 124), причем левая пластина B заряжена отрицательно, а правая D положительно. Вычислим работу, совершаемую полем при перемещении заряда q из точки *1*, находящейся на расстоянии d_1 от пластины B, в точку *2*, расположенную на расстоянии $d_2 < d_1$ от той же пластины. Точки *1* и *2* лежат на одной силовой линии.

На участке пути $\Delta d = d_1 - d_2$ электрическое поле совершит работу:

$$A = qE(d_1 - d_2). \qquad (8.18)$$

Эта работа не зависит от формы траектории.

Соответствующее доказательство для постоянной силы тяжести $m\vec{g}$ приведено в учебнике физики для VIII класса и повторять его для постоянной силы $q\vec{E}$ нет необходимости. Здесь существен только факт постоянства силы, но не ее происхождение.

Потенциальная энергия. *Если работа не зависит от формы траектории движения тела, то она равна изменению потенциальной энергии тела, взятому с противоположным знаком.* (Об

этом подробно говорилось в курсе физики VIII класса.) Действительно,

$$A = qE(d_1 - d_2) = -(qEd_2 - qEd_1) = -(W_{p2} - W_{p1}) = -\Delta W_p,$$

где

$$\boxed{W_p = qEd} \qquad (8.19)$$

— потенциальная энергия заряда в однородном электрическом поле на расстоянии d от пластины.

Формула (8.19) подобна формуле $W_p = mgh$ для потенциальной энергии тела над поверхностью Земли. Но заряд q в отличие от массы может быть как положительным, так и отрицательным. Если $q < 0$, то потенциальная энергия (8.19) отрицательна[1].

Если поле совершает положительную работу, то потенциальная энергия заряженного тела в поле уменьшается: $\Delta W_p < 0$. Одновременно согласно закону сохранения энергии растет его кинетическая энергия. На этом основано ускорение электронов электрическим полем в электронных лампах, телевизионных трубках и т. д. Наоборот, если работа отрицательна (например, при движении положительно заряженной частицы в направлении, противоположном направлению напряженности $\vec{E}$; это движение подобно движению камня, брошенного вверх), то $\Delta W_p > 0$. Потенциальная энергия растет, а кинетическая энергия уменьшается: частица тормозится.

На замкнутой траектории, когда заряд возвращается в начальную точку *1*, работа поля равна нулю:

$$A = -\Delta W_p = -(W_{p1} - W_{p1}) = 0.$$

Нулевой уровень потенциальной энергии. Потенциальная энергия (8.19) равна нулю на поверхности пластины B. Это означает, что нулевой уровень потенциальной энергии совпадает с пластиной B. Но, как и в случае сил тяготения, нулевой уровень потенциальной энергии выбирают произвольно. Можно считать, что $W_p = 0$ на расстоянии d_2 от пластины B. Тогда

$$W_p = qEd - qEd_2.$$

Физический смысл имеет не сама потенциальная энергия, а разность ее значений, определяемая работой поля при перемещении заряда из начального положения в конечное.

---

[1] Кроме того, если направление силы тяжести мы не можем изменить, то направление электрического поля изменить очень легко, поменяв знаки зарядов пластин B и D. При этом в выражении для потенциальной энергии (8.19) появится знак минус.

49. ПОТЕНЦИАЛ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ И РАЗНОСТЬ ПОТЕНЦИАЛОВ

Потенциальные поля. Можно доказать, что работа любого электростатического поля при перемещении заряженного тела из одной точки в другую не зависит от формы траектории, так же как и работа однородного поля. На замкнутой траектории работа электростатического поля всегда равна нулю. Поля, обладающие таким свойством, называют потенциальными. Потенциальный характер, в частности, имеет электростатическое поле точечного заряда.

Работу потенциального поля можно выразить через изменение потенциальной энергии. Формула $A=-(W_{p2}-W_{p1})$ справедлива для произвольного электростатического поля. Но только в случае однородного поля энергия выражается формулой (8.19)

Потенциал. Потенциальная энергия заряда в электростатическом поле пропорциональна заряду. Это справедливо как для однородного поля (см. формулу 8.19), так и для любого другого. Следовательно, *отношение потенциальной энергии к заряду не зависит от помещенного в поле заряда.*

Это позволяет ввести новую количественную характеристику поля — потенциал. **Потенциалом электростатического поля называют отношение потенциальной энергии заряда в поле к этому заряду.**

Согласно данному определению потенциал равен:

$$\varphi=\frac{W_p}{q}. \qquad (8.20)$$

Напряженность поля $\vec{E}$ является вектором и представляет собой силовую характеристику поля; она определяет силу, действующую на заряд q в данной точке поля. Потенциал φ — скаляр, это энергетическая характеристика поля; он определяет потенциальную энергию заряда q в данной точке поля.

Если в качестве нулевого уровня потенциальной энергии, а значит, и потенциала принять отрицательно заряженную пластину (рис. 124), то согласно формулам (8.19 и 8.20) потенциал однородного поля равен:

$$\varphi=\frac{W_p}{q}=Ed. \qquad (8.21)$$

Разность потенциалов. Подобно потенциальной энергии, значение потенциала в данной точке зависит от выбора нулевого уровня для отсчета потенциала. Практическое значение имеет не сам потенциал в точке, а изменение потенциала, которое не зависит от выбора нулевого уровня отсчета потенциала.

Так как потенциальная энергия $W_p=q\varphi$, то работа равна:

$$A=-(W_{p2}-W_{p1})=-q(\varphi_2-\varphi_1)=-q\Delta\varphi. \qquad (8.22)$$

В дальнейшем вместо изменения потенциала $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$, представляющего собой разность значений потенциала в конечной и начальной точках траектории, будем использовать другую величину — разность потенциалов. *Под разностью потенциалов понимают разность значений потенциала в начальной и конечной точках траектории:*

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = -\Delta\varphi. \qquad (8.23)$$

Часто разность потенциалов называют также напряжением.

С разностью потенциалов, или напряжением U, удобнее иметь дело, чем с изменением потенциала $\Delta\varphi$, особенно при изучении электрического тока.

Согласно формулам (8.22) и (8.23) разность потенциалов равна:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = -\Delta\varphi = \frac{A}{q}. \qquad (8.24)$$

Таким образом, **разность потенциалов (напряжение) между двумя точками равна отношению работы поля по перемещению заряда из начальной точки в конечную к этому заряду.**

Зная напряжение в осветительной сети, мы тем самым знаем работу, которую электрическое поле может совершить при перемещении единичного заряда от одного контакта розетки к другому по любой электрической цепи. С понятием разности потенциалов мы будем иметь дело на протяжении всего курса физики.

Единица разности потенциалов. Единицу разности потенциалов устанавливают с помощью формулы (8.24). В Международной системе единиц работу выражают в джоулях, а заряд — в кулонах. Поэтому **разность потенциалов между двумя точками равна единице, если при перемещении заряда в 1 Кл из одной точки в другую электрическое поле совершает работу в 1 Дж. Эту единицу называют вольтом (В).** $1\ \text{В} = \frac{1\ \text{Дж}}{1\ \text{Кл}}$.

1. Какие поля называют потенциальными? **2.** Как связано изменение потенциальной энергии с работой? **3.** Чему равна потенциальная энергия заряженной частицы в однородном электрическом поле? **4.** Дайте определение потенциала. **5.** Чему равна разность потенциалов между двумя точками поля?

50. ПОТЕНЦИАЛ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ТОЧЕЧНОГО ЗАРЯДА

Вывод формулы для потенциала электрического поля точечного заряда q в зависимости от расстояния r довольно сложен, и мы на нем останавливаться не будем. Напряженность поля точечного заряда убывает с расстоянием, и для нахождения потенциала нужно вычислять работу переменной кулоновской силы.

Выражение для потенциала поля точечного заряда имеет вид:

$$\varphi = k\frac{q}{\varepsilon r}. \qquad (8.25)$$

Очевидно, что потенциал точек поля положительного заряда ($q>0$) также положителен ($\varphi>0$), а отрицательного ($q<0$) отрицателен ($\varphi<0$).

Формула (8.25) соответствует определенному выбору нулевого уровня потенциала. Принято считать потенциал бесконечно удаленных от заряда точек поля равным нулю: $r \to \infty$ и $r \to \infty$ $\varphi \to 0$. Такой выбор нулевого уровня удобен, но не обязателен. Можно было бы к потенциалу (8.25) прибавить любую постоянную величину. От этого разность потенциалов между любыми точками поля не изменяется, а именно она имеет практическое значение.

Если потенциал бесконечно удаленных точек принят за нулевой, потенциал поля точечного заряда будет иметь простой физический смысл. Подставляя в формулу (8.24) значение $\varphi_2=0$, получим:

$$\varphi_1(r) = \frac{A}{q}.$$

Следовательно, потенциал электростатического поля на расстоянии r от точечного заряда численно равен работе поля по перемещению единичного положительного заряда из данной точки пространства в бесконечно удаленную точку.

Формула (8.25) справедлива также и для потенциала поля равномерно заряженного шара на расстояниях, больших или равных его радиусу, так как поле равномерно заряженного шара вне его и на его поверхности совпадает с полем точечного заряда, помещенного в центре сферы.

Мы рассмотрели потенциал поля точечного заряда. Заряд любого тела можно мысленно разделить на столь малые элементы, что каждый из них будет представлять собой точечный заряд. Тогда потенциал поля в произвольной точке определится как алгебраическая сумма потенциалов, создаваемых отдельными точечными зарядами φ_1, φ_2, φ_3 и т. д.:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \ldots \qquad (8.26)$$

Это соотношение является следствием принципа суперпозиции полей.

Потенциальная энергия взаимодействия двух точечных зарядов. Зная выражение для потенциала поля точечного заряда, можно вычислить потенциальную энергию взаимодействия двух точечных зарядов. Это может быть, в частности, энергия взаимодействия электрона с атомным ядром.

Потенциальная энергия заряда q_2 в электрическом поле точечного заряда q_1 равна произведению заряда q_2 на потенциал $\varphi(q_1)$ поля заряда q_1: $W_p = q_2\varphi(q_1)$.

Используя формулу (8.25), получим выражение для энергии:

$$W_p = q_2\varphi(q_1) = k\frac{q_1 q_2}{\varepsilon r}.$$

Если заряды q_1 и q_2 имеют одинаковые знаки, то потенциальная энергия их взаимодействия положительна. Она тем больше, чем меньше расстояние между зарядами, так как работа, которую могут совершить кулоновские силы при отталкивании зарядов друг от друга, будет больше. Если заряды имеют противоположные знаки, то энергия отрицательна и максимальное ее значение, равное нулю, достигается при $r \to \infty$. Чем больше r, тем большую работу совершат силы притяжения при сближении зарядов.

51. СВЯЗЬ МЕЖДУ НАПРЯЖЕННОСТЬЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И РАЗНОСТЬЮ ПОТЕНЦИАЛОВ. ЭКВИПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ

Между напряженностью электрического поля и разностью потенциалов существует определенная зависимость. Пусть заряд q перемещается в направлении напряженности однородного поля $\vec{E}$ из точки *1* в точку *2*, находящуюся на расстоянии Δd от точки *1* (рис. 125). Электрическое поле совершает работу

$$A = qE\Delta d.$$

Эту работу согласно формуле (8.24) можно выразить через разность потенциалов в точках *1* и *2*:

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU. \qquad (8.27)$$

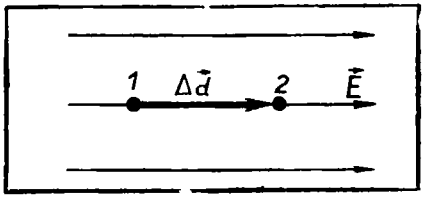
Приравнивая выражения для работы, найдем модуль вектора напряженности поля:

$$E = \frac{U}{\Delta d}. \qquad (8.28)$$

В этой формуле U — разность потенциалов между точками *1* и *2*, которые связаны вектором перемещения $\Delta\vec{d}$, совпадающим по направлению с вектором $\vec{E}$ (рис. 125).

Формула (8.28) показывает, что, чем меньше меняется потенциал на расстоянии Δd, тем меньше напряженность электрического поля. Если потенциал не меняется совсем, то напряженность поля равна нулю.

Рис. 125



Так как при перемещении положительного заряда в направлении вектора $\vec{E}$ электрическое поле совершает положительную работу $A = q(\varphi_1 - \varphi_2)$, то потенциал φ_1 больше потен-

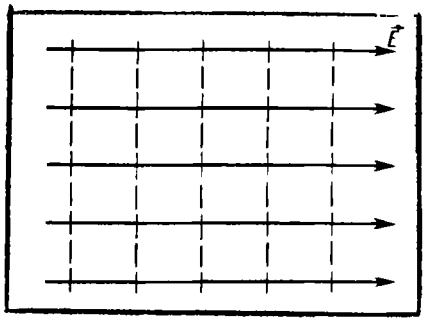


Рис. 126

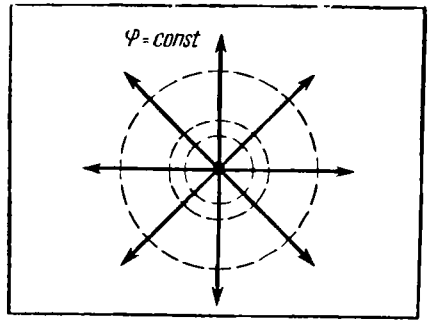


Рис. 127

циала φ_2. Следовательно, *напряженность электрического поля направлена в сторону убывания потенциала.*

Любое электрическое поле в малой области пространства можно считать однородным. Поэтому формула (8.28) справедлива для произвольного электрического поля, если только расстояние Δd настолько мало, что изменением напряженности поля на этом расстоянии можно пренебречь.

Единица напряженности электрического поля. Единицу напряженности электрического поля в единицах СИ устанавливают на основе единицы разности потенциалов, используя формулу (8.28). Напряженность электрического поля равна единице, если разность потенциалов между двумя точками на расстоянии 1 м в однородном поле равна 1 В. Наименование этой единицы вольт на метр (В/м).

Как уже говорилось, напряженность можно также выражать в ньютонах на кулон. Действительно,

$$1\,\frac{\text{В}}{\text{м}} = 1\,\frac{\text{Дж}}{\text{Кл}}\cdot\frac{1}{\text{м}} = 1\,\frac{\text{Н}\cdot\text{м}}{\text{Кл}}\cdot\frac{1}{\text{м}} = 1\,\frac{\text{Н}}{\text{Кл}}.$$

Эквипотенциальные поверхности. При перемещении заряда под углом 90° к силовым линиям поле не совершает работы, так как сила перпендикулярна перемещению. Значит, если провести поверхность, перпендикулярную в каждой точке силовым линиям, то при перемещении заряда вдоль этой поверхности работа не совершается. А это, в свою очередь, означает, что *все точки поверхности, перпендикулярной силовым линиям, имеют один и тот же потенциал.* **Поверхности равного потенциала называют эквипотенциальными.**

Эквипотенциальные поверхности однородного поля представляют собой плоскости (рис. 126), а поля точечного заряда — концентрические сферы (рис. 127). Эквипотенциальные поверхности поля диполя изображены на рисунке 128.

Подобно силовым линиям, эквипотенциальные поверхности качественно характеризуют распределение поля в пространстве.

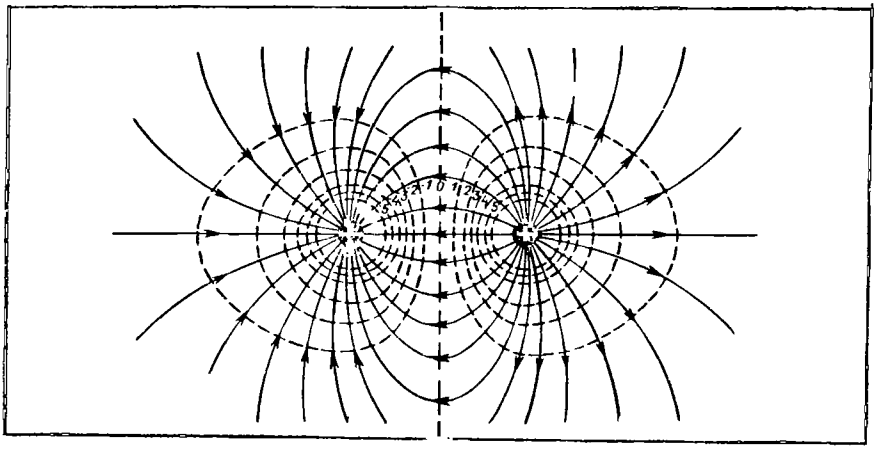


Рис. 128

Вектор напряженности перпендикулярен эквипотенциальным поверхностям и направлен в сторону уменьшения потенциала. Так, например, потенциал поля точечного положительного заряда убывает по мере удаления от заряда, и напряженность поля направлена от заряда вдоль радиусов концентрических сфер (рис. 127).

Эквипотенциальной является поверхность любого проводника в электростатическом поле. Ведь силовые линии поля перпендикулярны поверхности проводника. Причем не только поверхность, но и *все точки внутри проводника имеют один и тот же потенциал.* Напряженность поля внутри проводника равна нулю, а значит, равна нулю и разность потенциалов между любыми точками проводника.

52. ИЗМЕРЕНИЕ РАЗНОСТИ ПОТЕНЦИАЛОВ

Для измерения разности потенциалов используют прибор, называемый электрометром. На рисунке 129 изображен один из простейших электрометров. Основная его часть — легкая алюминиевая стрелка, укрепленная на металлическом стержне с помощью горизонтальной оси. Центр тяжести стрелки находится ниже оси, так что до начала измерения стрелка располагается вертикально. Стержень со стрелкой помещен в металлический корпус, изолированный от стержня эбонитовой пробкой. Для наблюдения за стрелкой имеется смотровое окно. Электрометр напоминает электроскоп, но отличается от него тем, что имеет металлический корпус.

Для измерения разности потенциалов между двумя проводниками один из них присоединяют к стержню электрометра,

а другой — к его корпусу. (Если хотят измерить потенциал тела относительно земли, то тело соединяют проводником со стержнем, а корпус заземляют.) Тогда между корпусом и стержнем устанавливается разность потенциалов, которую нужно измерить. Электрическое поле внутри электрометра зависит только от этой разности потенциалов, так как внешнее электростатическое поле заряженных или поляризованных тел не проникает сквозь металлический корпус прибора (электростатическая защита). Распределение же поля внутри электрометра однозначно определяет силы, действующие на стрелку. Чтобы по положению стрелки можно было судить о разности потенциалов, прибор нужно проградуировать. Для этого необходимо найти, какие углы отклонения стрелки соответствуют известным значениям напряжения между заряженными проводниками.

С помощью электрометра легко убедиться на опыте, что все точки проводника имеют одинаковый потенциал относительно земли. Для этого соединяют проволокой различные участки проводника со стержнем электрометра, корпус которого заземлен (рис. 130). Показания электрометра при этом меняться не будут.

? **1. Чему равен потенциал поля точечного заряда? 2. Как связана разность потенциалов с напряженностью электрического поля? 3. Что понимают под единицей разности потенциалов 1 вольт? 4. Чему равна разность потенциалов между точками заряженного проводника?**

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

При решении задач с использованием понятия напряженности электрического поля нужно прежде всего знать формулы (8.10) и (8.15), определяющие силу, действующую на заряд со стороны электрического поля, и напряженность поля точечного заряда. Напряженность электрического поля, созданного несколькими

Рис. 129

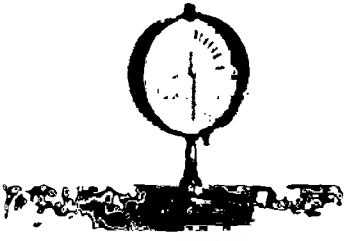
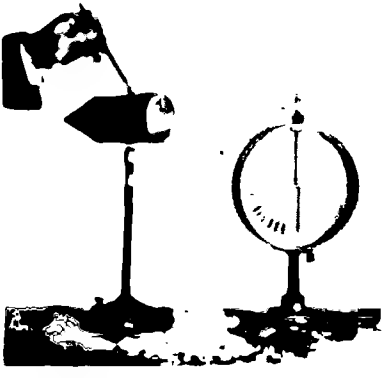


Рис. 130



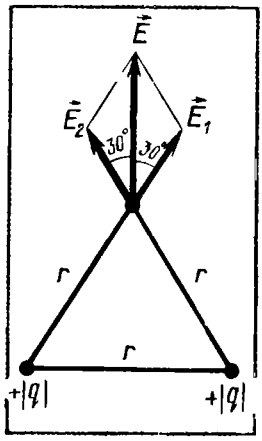


Рис. 131

точечными зарядами, равна геометрической сумме напряженностей полей отдельных зарядов.

Работа сил, действующих на заряд со стороны поля, выражается через разность потенциальных энергий или разность потенциалов (формула 8.27). Потенциал однородного поля определяется формулой (8.21), а потенциал поля точечного заряда — формулой (8.25).

Часто при решении задач надо учитывать, что все точки проводника в электростатическом поле имеют один и тот же потенциал, а напряженность поля внутри проводника равна нулю.

1. Два одинаковых положительных точечных заряда расположены на расстоянии r друг от друга в однородной среде с диэлектрической проницаемостью ε. Найти напряженность электрического поля и потенциал в точке, расположенной на одинаковом расстоянии r как от одного, так и от другого заряда.

Решение. Согласно принципу суперпозиции искомая напряженность $\vec{E}$ равна геометрической сумме напряженностей полей, созданных каждым из зарядов (рис. 131). Модули напряженностей полей каждого из зарядов равны: $E_1 = E_2 = k\frac{|q|}{\varepsilon r^2}$. Диагональ параллелограмма, построенного на векторах $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$, есть напряженность результирующего поля, модуль которой равен:

$$E = 2E_1 \cos 30° = 2k\frac{|q|}{\varepsilon r^2}\frac{\sqrt{3}}{2} = k\frac{|q|\sqrt{3}}{\varepsilon r^2}.$$

Потенциал φ равен сумме потенциалов $\varphi_1 = k\frac{q}{\varepsilon r}$, созданных каждым из зарядов:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_1 = k\frac{2q}{\varepsilon r}.$$

2. Проводящая сфера радиуса $r = 0{,}2$ м, заряженная до потенциала $\varphi = 3 \cdot 10^5$ В, находится в диэлектрике с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 27$. Определить: 1) заряд сферы q; 2) модуль напряженности E электрического поля на ее поверхности; 3) модуль напряженности E_1 и потенциал φ_1 электрического поля в точке, отстоящей на расстоянии $r_1 = 10$ м от центра сферы; 4) модуль напряженности E_0 и потенциал φ_0 в центре сферы.

Решение. Электрическое поле заряженной сферы вне сферы совпадает с полем точечного заряда. Поэтому

$$\varphi = k\frac{q}{\varepsilon r}; \quad E = k\frac{|q|}{\varepsilon r^2}.$$

Следовательно,

1) $q=\frac{1}{k}\varepsilon r\varphi$; $\quad q=1{,}8\cdot10^{-4}$ Кл;

2) $E=k\frac{|q|}{\varepsilon r^2}=\frac{\varphi}{r}$; $\quad E=1{,}5\cdot10^{6}$ В/м;

3) $E_1=k\frac{|q|}{\varepsilon r_1^2}=\frac{r\varphi}{r_1^2}$; $\quad E_1=600$ В/м; $\quad \varphi_1=k\frac{q}{\varepsilon r_1}=\frac{r\varphi}{r_1}$, $\varphi_1=6000$ В.

4) Заряд $q>0$ распределен равномерно по поверхности сферы. Напряженность поля в любой точке внутри проводящей сферы равна нулю: $E_0=0$. Поэтому потенциалы всех точек внутри сферы должны быть одинаковыми (и равными потенциалам точек самой сферы): $\varphi_0=\varphi$.

Упр. 9

1. В направленном вертикально вниз однородном электрическом поле с напряженностью $1{,}3\cdot10^5$ В/м капелька жидкости массой $2\cdot10^{-9}$ г оказалась в равновесии. Найти заряд капельки и число избыточных электронов на ней.

2. Начертить график зависимости модуля напряженности поля заряженного проводящего шара от расстояния до его центра.

3. Почему заряженная расческа притягивает электрически нейтральные кусочки бумаги?

4. Электрический заряд $q_1>0$ переместили по замкнутому контуру $ABCDA$ в поле точечного заряда $q_2>0$ (рис. 132). На каких участках работа поля по перемещению заряда была положительной? отрицательной? равной нулю? Как изменялась потенциальная энергия системы? Чему равна полная работа по перемещению заряда?

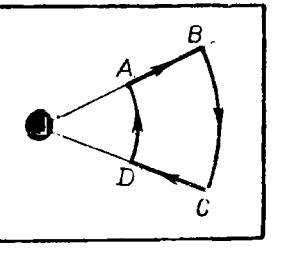
5. Двигаясь в электрическом поле, электрон перешел из одной точки в другую, потенциал которой выше на 1 В. На сколько изменилась кинетическая энергия электрона? потенциальная?

6. Точечные заряды $q_1>0$ и $q_2>0$ расположены в двух вершинах равностороннего треугольника со стороной r. Найти модуль вектора напряженности и потенциал электростатического поля в третьей вершине, если диэлектрическая проницаемость среды равна ε.

7. Потенциал электростатического поля возрастает в направлении снизу вверх. Куда направлен вектор напряженности поля?

8. Разность потенциалов между точками, лежащими на одной силовой линии на расстоянии 3 см друг от друга, равна 120 В. Найти напряженность электростатического поля, если известно, что поле однородно.

Рис. 132



9. Изобразить эквипотенциальные поверхности бесконечного проводящего равномерно заряженного цилиндра.

10. Электрон, двигаясь в электрическом поле, увеличил скорость с $v_1=1\cdot10^7$ м/с до $v_2=3\cdot10^7$ м/с. Найти разность потенциалов между начальной и конечной точками перемещения электрона. Отношение заряда электрона к его массе равно: $\frac{e}{m}=1{,}76\times$ $\times10^{11}$ Кл/кг.

53. ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ. ЕДИНИЦЫ ЭЛЕКТРОЕМКОСТИ

При любом способе заряжения тел — с помощью трения, электростатической машины, гальванического элемента и т. д.— первоначально нейтральные тела заряжаются вследствие того, что некоторая часть заряженных частиц переходит от одного тела к другому. Обычно этими частицами являются электроны.

Выясним важный для практики вопрос: при каком условии можно накопить на проводящих телах большой электрический заряд?

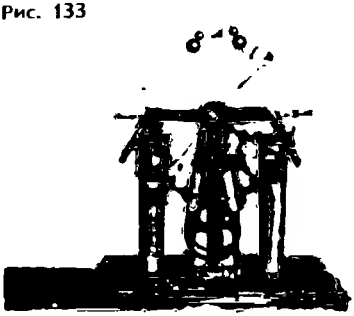
При заряжении двух проводников, например, от электростатической машины один из них приобретает заряд $+|q|$, а другой $-|q|$. Между проводниками появляется электрическое поле и возникает разность потенциалов (напряжение). С увеличением напряжения электрическое поле между проводниками усиливается.

В сильном электрическом поле (при большом напряжении) диэлектрик (например, воздух) становится проводящим. Наступает так называемый «пробой» диэлектрика: между проводниками проскакивает искра (рис. 133), и они разряжаются. Чем медленнее увеличивается напряжение между проводниками с увеличением их зарядов, тем больший заряд можно на них накопить.

Электроемкость. Введем физическую величину, характеризующую способность двух проводников накапливать электрический заряд. Эту величину называют электроемкостью.

Напряжение U между двумя проводниками пропорционально электрическому заряду, который находится на проводниках (на одном $+|q|$, а на другом $-|q|$). Это вытекает из принципа суперпозиции. Если заряды удвоить, то и напряженность электрического поля станет в два раза больше. Следовательно, в два раза увеличится работа, совершаемая полем при перемещении заряда, т. е. в два раза увеличится напряжение. Поэтому отношение заряда q одного из проводников (на другом находится такой же по модулю заряд) к разности потенциалов между этим проводником и соседним не зависит от заряда. Оно определяется лишь геометрическими размерами проводников, их формой и взаимным расположением, а также электрическими свойствами окружающей среды (диэлектрической проницаемостью ε). Это позволяет ввести понятие электроемкости двух проводников.

Рис. 133



Электроемкостью двух проводников называют отношение заря-

да одного из проводников к разности потенциалов между этим проводником и соседним:

$$C=\frac{q}{U}. \qquad (8.29)$$

Чем меньше напряжение U при сообщении проводникам зарядов $+|q|$ и $-|q|$, тем больше электроемкость проводников. На проводниках можно накопить большие заряды, не вызывая пробоя диэлектрика.

Иногда говорят об электроемкости одного проводника. Это имеет смысл, если проводник является уединенным, т. е. расположен на большом по сравнению с его размерами расстоянии от других проводников. Так говорят, например, о емкости проводящего шара. При этом подразумевается, что роль другого проводника играют удаленные предметы, расположенные вокруг шара.

Единицы электроемкости. Формула (8.29) позволяет ввести единицы электроемкости.

Электроемкость двух проводников равна единице, если при сообщении им зарядов $+1$ Кл и -1 Кл между ними возникает разность потенциалов 1 В. Эту единицу называют фарад (Ф). 1 Ф $=1$ Кл/В.

Из-за того, что заряд в 1 Кл очень велик, емкость в 1 Ф очень велика. Поэтому на практике часто используют доли этой единицы: микрофарад (мкФ) — 10^{-6} Ф и пикофарад (пФ) — 10^{-12} Ф.

54. КОНДЕНСАТОРЫ. ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ ПЛОСКОГО КОНДЕНСАТОРА[1]

Большой электроемкостью обладают системы из двух проводников, называемые конденсаторами. **Конденсатор представляет собой два проводника, разделенные слоем диэлектрика, толщина которого мала по сравнению с размерами проводников.** Проводники в этом случае называют обкладками конденсатора.

Простейший плоский конденсатор состоит из двух одинаковых параллельных пластин, находящихся на малом расстоянии друг от друга (рис. 134). Если заряды пластин одинаковы по модулю и противоположны по знаку, то силовые линии электрического поля начинаются на положительно заряженной обкладке конденсатора и оканчиваются на отрицательно заряженной. Поэтому почти все электрическое поле сосредоточено внутри конденсатора.

[1] Слово «конденсатор» в переводе на русский язык означает «сгуститель». В данном случае — «сгуститель электрического заряда».

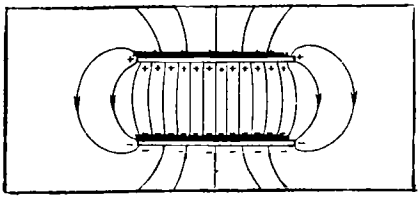


Рис. 134

У сферического конденсатора, состоящего из двух концентрических сфер, все поле сосредоточено между ними.

Для зарядки конденсатора нужно присоединить его обкладки к полюсам источника напряжения, например к полюсам батареи аккумуляторов. Можно также соединить одну обкладку с полюсом батареи, другой полюс которой заземлен, а вторую заземлить. Тогда на заземленной обкладке останется заряд, противоположный по знаку и равный по модулю заряду другой обкладки. Такой же по модулю заряд уйдет в землю.

Под зарядом конденсатора понимают абсолютное значение заряда одной из обкладок.

Электроемкость конденсатора определяется формулой (8.29).

Электрические поля окружающих тел почти не проникают внутрь конденсатора и не влияют на разность потенциалов между его обкладками. Поэтому электроемкость конденсатора практически не зависит от наличия вблизи него каких-либо тел.

Первый конденсатор, названный лейденской банкой, был создан в середине XVIII в. Было обнаружено, что гвоздь, вставленный в стеклянную банку с ртутью, накапливает большой электрический заряд. В таком конденсаторе ртуть служила одной обкладкой, а ладони экспериментатора, державшего банку,— другой. Впоследствии обе обкладки стали делать из тонкой латуни или станиоля.

Электроемкость плоского конденсатора. Вычислим емкость плоского конденсатора. Обозначим площадь каждой его пластины S, а расстояние между пластинами d. Для вычисления емкости по формуле (8.29) надо выразить разность потенциалов U через заряд q. Эта разность потенциалов определяется напряженностью E поля, которая зависит от зарядов обкладок конденсатора.

Напряженность E_1 поля, созданного одной из пластин, вычисляется по формуле (8.16). Напряженности поля положительно и отрицательно заряженных пластин равны по модулю и направлены внутри конденсатора в одну и ту же сторону. Поэтому модуль E результирующей напряженности равен сумме модулей напряженностей поля двух пластин:

$$E=2E_1=k\frac{4\pi\sigma}{\varepsilon}.$$

Формула для емкости запишется более компактно, если вместо коэффициента k использовать его выражение в виде (8.6): $k=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$. Тогда, учитывая, что поверхностная плотность заряда

$\sigma = \frac{q}{S}$, получим:

$$E = \frac{q}{\varepsilon_0 \varepsilon S}.$$

Следовательно, $U = Ed = \frac{qd}{\varepsilon_0 \varepsilon S}$.

Подставляя это выражение в (8.29) и сокращая на q, получим формулу для электроемкости плоского конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}. \qquad (8.30)$$

Мы видим, что электроемкость конденсатора зависит от геометрических факторов: площади пластин и расстояния между ними, а также от электрических свойств среды. Она не зависит от материала проводников: обкладки конденсатора могут быть железными, медными, алюминиевыми и т. д.

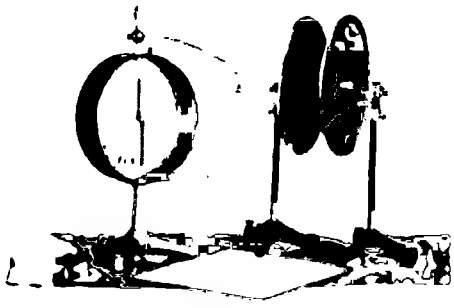
Проверим на опыте формулу (8.30), полученную теоретически. Для этого возьмем конденсатор, расстояние между пластинами которого можно изменять, и электрометр с заземленным корпусом (рис. 135). Соединим корпус и стержень электрометра с пластинами конденсатора проводниками и зарядим конденсатор. Для этого нужно коснуться наэлектризованной палочкой пластины конденсатора, соединенной со стержнем. Электрометр покажет разность потенциалов между пластинами.

Раздвинув пластины, мы обнаружим увеличение разности потенциалов. Согласно определению электроемкости (8.29) это указывает на ее уменьшение. В соответствии с формулой (8.30) электроемкость действительно должна уменьшаться с увеличением расстояния между пластинами.

Вставив между обкладками конденсатора пластину из диэлектрика, например из органического стекла, мы обнаружим уменьшение разности потенциалов. Следовательно, электроемкость конденсатора увеличивается.

Расстояние между пластинами d может быть очень малым, а площадь S и диэлектрическая проницаемость — достаточно большими. Поэтому при небольших размерах конденсатор может иметь большую электроемкость. Впрочем, плоский конденсатор электроемкостью в 1 Ф должен был бы иметь площадь пластин $S = 100$ км^2 при расстоянии между пластинами $d = 1$ мм.

Рис. 135



Измерение диэлектрической проницаемости. Зависи-

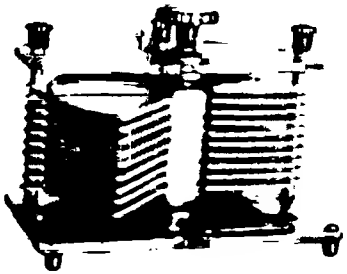


Рис. 136

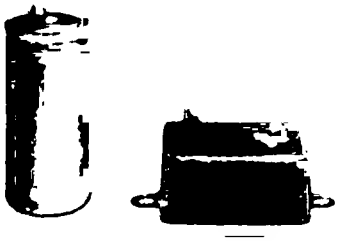


Рис. 137

мость емкости конденсатора от электрических свойств вещества между его обкладками используется для измерения диэлектрической проницаемости вещества. Для этого нужно экспериментально определить отношение емкостей конденсатора с диэлектрической пластиной между обкладками (C) и без нее (C_0). Как следует из формулы (8.30), диэлектрическая проницаемость

$$\varepsilon = \frac{C}{C_0}.$$

Различные типы конденсаторов. В зависимости от назначения конденсаторы имеют различное устройство. Обычный технический бумажный конденсатор состоит из двух полосок алюминиевой фольги, изолированных друг от друга и от металлического корпуса бумажными лентами, пропитанными парафином. Полоски и ленты туго свернуты в пакет небольшого размера.

В радиотехнике широко применяют конденсаторы переменной электроемкости (рис. 136). Такой конденсатор состоит из двух систем металлических пластин, которые при вращении рукоятки могут входить одна в другую. При этом меняется площадь перекрывающейся части пластин и, следовательно, их электроемкость. Диэлектриком в таких конденсаторах служит воздух.

Значительного увеличения электроемкости за счет уменьшения расстояния между обкладками достигают в так называемых электролитических конденсаторах (рис. 137). Диэлектриком в них служит очень тонкая пленка оксидов, покрывающих одну из обкладок (полосу фольги). Второй обкладкой служит бумага, пропитанная раствором специального вещества (электролита).

55. ЭНЕРГИЯ ЗАРЯЖЕННОГО КОНДЕНСАТОРА. ПРИМЕНЕНИЯ КОНДЕНСАТОРОВ

Энергия заряженного конденсатора. Для того чтобы зарядить конденсатор, нужно совершить работу по разделению положительных и отрицательных зарядов. Согласно закону сохранения энергии эта работа равна энергии, приобретаемой конденсатором.

В том, что заряженный конденсатор обладает энергией, можно

убедиться, если разрядить конденсатор, например лейденскую банку, с помощью специального разрядника (рис. 138). При этом между шариком разрядника и обкладкой конденсатора проскакивает искра. Энергия конденсатора превращается в другие формы: механическую, световую, тепловую. Чем больше электроемкость конденсатора и напряжение, тем мощнее будет искра.

Выведем формулу для энергии плоского конденсатора. Напряженность поля, созданного зарядом одной из пластин, равна $\frac{E}{2}$, где E — напряженность поля в конденсаторе (см. § 54). В однородном поле одной пластины находится заряд q, распределенный по поверхности другой пластины (рис. 139). Согласно формуле (8.19) для потенциальной энергии заряда в однородном поле энергия конденсатора равна:

$$W_p = q\frac{E}{2}d \qquad (8.31)$$

где q — заряд конденсатора, а d — расстояние между пластинами[1].

Так как $Ed = U$ — разность потенциалов между обкладками конденсатора, то его энергия равна:

$$\boxed{W_p = \frac{qU}{2}} \qquad (8.32)$$

Эта энергия равна работе, которую совершит электрическое поле при сближении пластин вплотную.

[1] Формула (8.19) справедлива для энергии точечного заряда в однородном поле. Но заряд на пластине можно мысленно разделить на малые элементы Δq. Энергия каждого элемента равна: $\Delta W_p = \Delta q\frac{E}{2}d$. Суммируя эти энергии, получим формулу (8.31).

Рис. 138

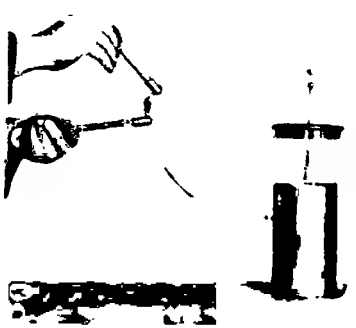
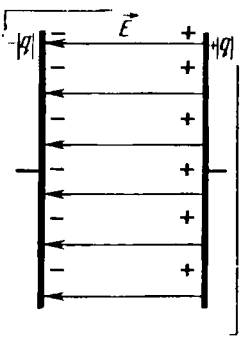


Рис. 139



Заменив в формуле (8.32) либо разность потенциалов, либо заряд с помощью выражения (8.29) для электроемкости конденсатора, получим:

$$W_p = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2}. \qquad (8.33)$$

Можно доказать, что эти формулы справедливы для энергии любого конденсатора, а не только плоского.

Энергия электрического поля. Согласно теории близкодействия вся энергия взаимодействия заряженных тел сконцентрирована в электрическом поле этих тел. Значит, энергия может быть выражена через основную характеристику поля — напряженность.

Подставим в формулу (8.33) значение электроемкости плоского конденсатора (см. 8.30) и выразим разность потенциалов в этой формуле через напряженность поля: $U = Ed$. Тогда энергия конденсатора будет равна:

$$W_p = \frac{CU^2}{2} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d} \cdot \frac{E^2 d^2}{2} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} Sd. \qquad (8.34)$$

Разделив (8.34) на объем Sd, занятый полем, получим энергию, приходящуюся на единицу объема, т. е. плотность энергии:

$$w_p = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2}. \qquad (8.35)$$

Эта формула справедлива не только для однородного поля плоского конденсатора, но и для любого другого электростатического поля. Более того, полученное выражение для плотности энергии оказывается справедливым и для переменных электрических полей.

Применения конденсаторов. Энергия конденсатора обычно не очень велика — не более сотен джоулей. К тому же она не сохраняется долго из-за неизбежной утечки заряда. Поэтому заряженные конденсаторы не могут заменить, например, аккумуляторов в качестве источников электрической энергии.

Но это совсем не означает, что конденсаторы как накопители энергии не получили практического применения. Они имеют одно важное свойство. Конденсатор может накапливать энергию более или менее длительное время, а при разрядке его через цепь малого сопротивления он отдает энергию почти мгновенно. Вот это свойство и используют широко на практике.

Лампа-вспышка, например, применяемая в фотографии, питается током разряда конденсатора, заряжаемого предварительно специальной батареей. Возбуждение квантовых источников света — лазеров — осуществляется с помощью газоразрядной трубки, вспышка которой происходит при разрядке батареи конденсаторов большой электроемкости.

Однако основное применение конденсаторы находят в радиотехнике. Конденсаторы используются в различных электрических

цепях для получения определенного изменения напряжения за счет изменения заряда. Причем конденсаторы большой электроемкости способны накапливать или отдавать большой заряд без значительного изменения напряжения.

1. При каком условии можно накопить на проводниках большой электрический заряд? 2. Что называют электроемкостью двух проводников? 3. Почему понятие электроемкости не применимо к диэлектрикам? 4. От чего зависит электроемкость? 5. Дайте определение единицы электроемкости. 6. Чему равна электроемкость плоского конденсатора? 7. Чему равна энергия конденсатора? 8. Перечислите основные применения конденсаторов.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Электроемкость — последняя тема раздела «Электростатика». При решении задач на эту тему могут потребоваться все сведения, полученные при изучении электростатики: сохранение электрического заряда, понятия напряженности поля и потенциала, поведение проводников в электростатическом поле, изменение напряженности поля в диэлектриках, закон сохранения энергии применительно к электростатическим явлениям. Только при хорошем усвоении всех основных понятий электростатики решение задач на электроемкость не вызовет особых затруднений.

Основными формулами при решении задач на электроемкость являются следующие: определение электроемкости (8.29) и выражение для электроемкости плоского конденсатора (8.30).

Часто конденсаторы соединяют друг с другом. Это позволяет при имеющемся наборе конденсаторов получать батареи конденсаторов различной электроемкости. В примерах решения задач № 2 и 3 рассчитываются емкости батарей конденсаторов. На эти задачи надо обратить внимание, так как полученные здесь формулы используются при решении ряда других задач.

1. Конденсатор имеет электроемкость $C=5$ пФ. Какой заряд находится на каждой из его обкладок, если разность потенциалов между ними $U=1000$ В?

Решение. Согласно формуле (8.29) электроемкость конденсатора $C=\frac{q}{U}$. Отсюда заряд обкладки равен: $q=CU$;

$$q=5\cdot 10^{-12}\cdot 1000 \text{ Кл}=5\cdot 10^{-9} \text{ Кл}.$$

2. Определить электроемкость батареи конденсаторов с электроемкостями C_1 и C_2, соединенных параллельно (рис. 140). (При параллельном соединении конденсаторов попарно соединены положительно и отрицательно заряженные пластины.)

Решение. При параллельном соединении разность потенциалов между обкладками одинакова для обоих конденсаторов.

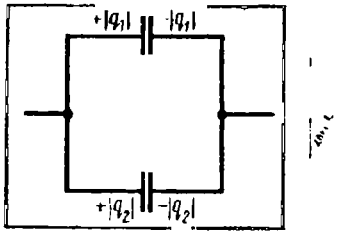


Рис. 140

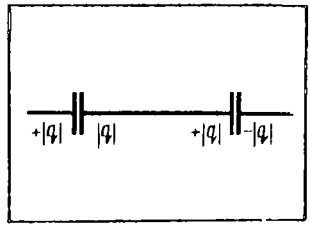


Рис. 141

Если заряд первого конденсатора равен q_1, а второго q_2, то заряд батареи равен: $q=q_1+q_2$. Электроемкость батареи конденсаторов $C=\frac{q}{U}=\frac{q_1+q_2}{U}$. Так как $C_1=\frac{q_1}{U}$ и $C_2=\frac{q_2}{U}$, то электроемкость батареи при параллельном соединении равна:

$$C=C_1+C_2. \tag{8.36}$$

3. Определить электроемкость батареи конденсаторов с электроемкостями C_1 и C_2, соединенных последовательно (рис. 141). (При последовательном соединении конденсаторов отрицательно заряженная обкладка одного конденсатора соединена с обкладкой следующего конденсатора, несущего такой же по модулю положительный заряд.)

Решение. В случае последовательного соединения конденсаторов заряды обоих конденсаторов одинаковы. Действительно, если заряд крайней обкладки первого конденсатора равен $+|q|$, то на противоположной обкладке появляется заряд $-|q|$. Так как проводник между конденсаторами и соединяемые им обкладки в целом нейтральны, то заряд внутренней обкладки второго конденсатора равен $+|q|$.

Емкость батареи из последовательно соединенных конденсаторов $C=\frac{q}{\varphi_1-\varphi_2}$, где φ_1 и φ_2 — потенциалы крайних обкладок. Емкости конденсаторов равны: $C_1=\frac{q}{\varphi_1-\varphi'}$ и $C_2=\frac{q}{\varphi'-\varphi_2}$, где φ' — потенциалы внутренних обкладок конденсаторов. Найдем сумму величин, обратных емкостям конденсаторов:

$$\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}=\frac{\varphi_1-\varphi'}{q}+\frac{\varphi'-\varphi_2}{q}=\frac{\varphi_1-\varphi_2}{q}=\frac{1}{C}.$$

Следовательно, при последовательном соединении величина, обратная емкости батареи, равна сумме величин, обратных емкостям отдельных конденсаторов:

$$\frac{1}{C}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}. \tag{8.37}$$

Упр. 10

1. Чему равна емкость плоского конденсатора, обкладки которого представляют собой две полоски фольги площадью $S=0{,}4$ м^2 каждая, разделенные парафинированной бумагой ($\varepsilon=2{,}2$) толщиной $d=0{,}08$ мм?

2. Разность потенциалов между обкладками конденсатора, описанного в предыдущей задаче, изменилась на 175 В. Определить изменение заряда конденсатора.

3. Заряд плоского конденсатора со слюдяным диэлектриком равен $2{,}7\cdot10^{-4}$ Кл. Площадь каждой пластины 2500 см^2. Диэлектрическая проницаемость слюды равна 7. Найти напряженность поля в диэлектрике.

4. В пространство между пластинами плоского конденсатора влетает электрон со скоростью $2\cdot10^7$ м/с, направленной параллельно пластинам конденсатора. На какое расстояние по направлению к положительно заряженной пластине сместится электрон за время движения внутри конденсатора, если его электроемкость $C=0{,}885$ пФ, длина конденсатора 0,05 м и разность потенциалов между пластинами 200 В? Площадь пластин конденсатора $S=0{,}002$ м^2. Отношение заряда электрона к его массе равно $1{,}76\cdot10^{11}$ Кл/кг.

5. Напряжение 300 В подано на батарею из двух конденсаторов, соединенных последовательно. Какова разность потенциалов на обкладках каждого конденсатора, если электроемкость первого 2 пФ, второго 3 пФ?

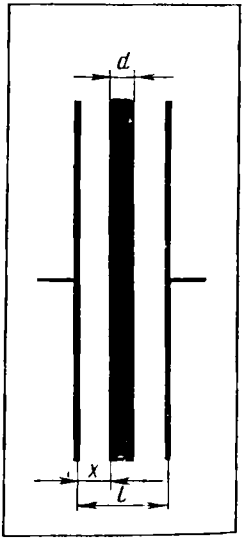
6. Конденсаторы электроемкостью 10 000 пФ и 1500 пФ соединены параллельно. Каков заряд второго конденсатора, если заряд первого $2\cdot10^{-6}$ Кл?

7. Найти электроемкость конденсатора C, площадь пластин которого S и расстояние между ними l, если в конденсатор вставлена металлическая пластина толщиной d, параллельная его обкладкам (рис. 142).

8. Во сколько раз изменится энергия заряженного и отсоединенного от источника конденсатора, если пространство между его обкладками заполнить диэлектриком с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon=3$?

9. Определить плотность энергии электрического поля конденсатора, упомянутого в задаче 4.

Рис. 142



КРАТКИЕ ИТОГИ ГЛАВЫ X

Неподвижные точечные электрические заряды q_1 и q_2 взаимодействуют в вакууме согласно закону Кулона с силой

$$F=k\frac{|q_1||q_2|}{r^2},$$

где коэффициент $k=9\cdot10^9\frac{\text{Н}\cdot\text{м}^2}{\text{Кл}^2}$. Заряд измеряется в кулонах.

Для замкнутой системы заряженных тел электрический заряд сохраняется.

Взаимодействие зарядов осуществляется посредством электрического поля. Напряженность поля $\vec{E}$ определяет силу, дей-

ствующую на заряд: $\vec{F}=q\vec{E}$. Напряженности полей, созданных отдельными зарядами, складываются геометрически (принцип суперпозиции).

Напряженность электрического поля точечного заряда в вакууме равна:

$$E=k\frac{|q|}{r^2}.$$

Эта же формула определяет напряженность поля вне равномерно заряженной сферы (r — расстояние от центра сферы). Напряженность поля плоскости $E=k2\pi|\sigma|$, где σ — поверхностная плотность заряда.

В проводниках имеются свободные электрические заряды. Напряженность поля и электрический заряд внутри проводника равны нулю (в электростатике).

В диэлектриках все заряды связаны внутри отдельных атомов или молекул. Под влиянием электрического поля связанные заряды различных знаков смещаются в противоположные стороны. Это явление называют поляризацией диэлектриков. Поляризованный диэлектрик создает электрическое поле, которое внутри диэлектрика ослабляет внешнее поле. В результате в однородном диэлектрике электрическое поле ослабевает в ε раз, где ε — диэлектрическая проницаемость.

Электростатическое поле потенциально: его работа не зависит от формы траектории заряда и равна изменению потенциальной энергии с противоположным знаком: $A=-\Delta W_p$.

Потенциальная энергия заряда в однородном поле $W_p=qEd$, где d — расстояние от плоскости, на которой потенциальная энергия принимается равной нулю.

Потенциалом электрического поля называют отношение потенциальной энергии заряда в поле к этому заряду:

$$\varphi=\frac{W_p}{q}.$$

Разность потенциалов (напряжение) между двумя точками равна отношению работы поля по перемещению заряда из начальной точки в конечную к этому заряду: $U=\varphi_1-\varphi_2=\frac{A}{q}$. Разность потенциалов измеряется в вольтах: $1\ \text{В}=\frac{1\ \text{Дж}}{1\ \text{Кл}}$.

Потенциал точечного заряда в вакууме равен:

$$\varphi=k\frac{q}{r}.$$

Напряженность поля связана с разностью потенциалов формулой

$$E=\frac{U}{\Delta d},$$

где U — разность потенциалов между двумя точками на одной силовой линии на малом расстоянии Δd друг от друга.

Способность проводников накапливать электрический заряд характеризуют электроемкостью. Электроемкость двух проводников равна:

$$C=\frac{q}{U},$$

где q — заряд одного из проводников (на другом проводнике заряд противоположного знака), а U — разность потенциалов между проводниками. Электроемкость не зависит от заряда проводников и определяется лишь их геометрическими размерами, формой и взаимным расположением, а также электрическими свойствами окружающей среды (диэлектрической проницаемостью ε).

Электроемкость измеряется в фарадах:

$$1\ \Phi=\frac{1\ \text{Кл}}{1\ \text{В}}.$$

Наибольший заряд накапливается в конденсаторах — системах двух проводников, размеры которых много больше расстояния между ними.

Емкость плоского конденсатора равна:

$$C=\frac{\varepsilon_0\varepsilon S}{d},$$

где S — площадь пластин, d — расстояние между ними, а $\varepsilon_0=\frac{1}{4\pi k}$ — электрическая постоянная.

Энергия заряженного конденсатора $W_p=\frac{qU}{2}$.

Плотность энергии электрического поля $w_p=\frac{\varepsilon_0\varepsilon E^2}{2}$.

* *
*

Мы потратили довольно много времени на изучение электричества, а рассмотрели лишь простейший частный случай неподвижных заряженных тел — электростатику. Может быть, не стоило уделять электростатике такое большое внимание? Нет, стоило! Мы ввели важнейшие понятия, используемые во всей электродинамике: «электрический заряд», «электрическое поле», «потенциал и разность потенциалов», «электроемкость», «энергия электрического поля». На простом частном случае выяснить суть этих фундаментальных понятий не так трудно, как в общем случае движущихся зарядов.

Теперь перейдем к изучению электромагнитных процессов, наблюдаемых при движении заряженных частиц.

Глава IX.

ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

56. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК. СИЛА ТОКА

При движении заряженных частиц происходит перенос электрического заряда из одного места в другое. Однако если заряженные частицы совершают беспорядочное тепловое движение, как, например, свободные электроны в металле, то переноса заряда не будет (рис. 143). Электрический заряд перемещается через сечение проводника лишь в том случае, если наряду с хаотическим движением электроны участвуют в упорядоченном движении (рис. 144). В этом случае говорят, что в проводнике устанавливается электрический ток.

Из курса физики VII класса вы знаете, что **электрическим током называют упорядоченное (направленное) движение заряженных частиц.** Электрический ток возникает при упорядоченном перемещении свободных электронов в металле или ионов в электролитах.

Однако если перемещать нейтральное в целом тело, то, несмотря на упорядоченное движение огромного числа электронов и атомных ядер, электрический ток не возникает. Полный заряд, переносимый через любое сечение проводника, будет при этом равным нулю, так как заряды разных знаков перемещаются с одинаковой средней скоростью. Ток в проводнике возникнет лишь в том случае, когда при движении зарядов в одном направлении положительный заряд, переносимый через сечение, не равен по модулю отрицательному.

Электрический ток имеет определенное направление. **За направление тока принимают направление движения положительно заряженных частиц.** *Если ток образован движением отрицательно заряженных частиц, то направление тока считают противоположным направлению движения частиц*[1].

Действия тока. Движение частиц в проводнике мы непосредственно не наблюдаем. Однако о наличии электрического тока можно судить по тем действиям или явлениям, которыми он сопровождается.

Во-первых, *проводник, по которому течет ток, нагревается.*

Во-вторых, *электрический ток может изменять химический состав проводника,* например выделять его химические составные части (медь из раствора медного купороса и т. д.). Такого рода

[1] Такой выбор направления тока не очень удачен, так как в большинстве случаев ток представляет собой движение электронов — отрицательно заряженных частиц. Выбор направления тока был сделан в то время, когда о свободных электронах в металлах еще ничего не знали.

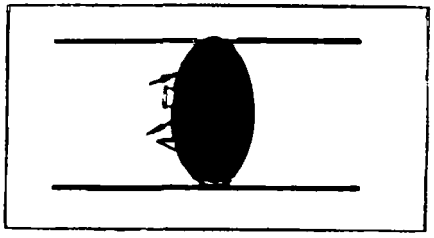


Рис. 143

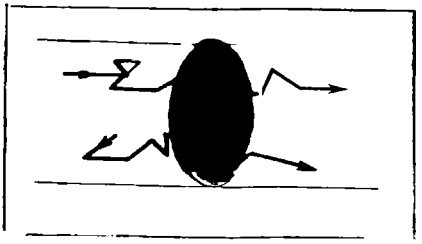


Рис. 144

процессы наблюдаются не у всех проводников, а только у растворов (или расплавов) электролитов[1].

В третьих, *ток оказывает магнитное действие*. Так, магнитная стрелка вблизи проводника с током поворачивается. Магнитное действие тока в отличие от химического и теплового является основным, так как проявляется у всех без исключения проводников. Химическое действие тока наблюдается лишь у электролитов, а нагревание отсутствует у сверхпроводников (см. § 60).

Сила тока. Если в цепи устанавливается электрический ток, то это означает, что через поперечное сечение проводника все время переносится электрический заряд. Заряд, перенесенный в единицу времени, служит основной количественной характеристикой тока, называемой силой тока. Если через поперечное сечение проводника за время Δt переносится заряд Δq, то сила тока равна:

$$I=\frac{\Delta q}{\Delta t}. \qquad (9.1)$$

Таким образом, **сила тока[2] равна отношению заряда Δq, переносимого через поперечное сечение проводника за интервал времени Δt, к этому интервалу времени.** Если сила тока со временем не меняется, то ток называют постоянным.

Сила тока, подобно заряду,— величина скалярная. Она может быть как положительной, так и отрицательной. Знак силы тока зависит от того, какое из направлений вдоль проводника принять за положительное. Сила тока $I>0$, если направление тока совпадает с условно выбранным положительным направлением вдоль проводника. В противном случае $I<0$.

Сила тока зависит от заряда, переносимого каждой частицей, концентрации частиц, скорости их направленного движения и площади поперечного сечения проводника. Покажем это.

[1] Подробно об этом рассказано в учебнике для IX класса «Неорганическая химия».

[2] Термин «сила тока» нельзя считать удачным, так как слово «сила», применяемое к току, не имеет никакого отношения к понятию силы в механике. Но термин «сила тока» был введен давно и утвердился в науке.

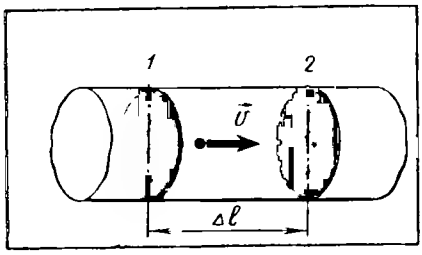


Рис. 145

Пусть проводник имеет поперечное сечение площадью S. За положительное направление в проводнике примем направление слева направо. Заряд каждой частицы равен q_0. В объеме проводника, ограниченном сечениями *1* и *2*, содержится $nS\Delta l$ частиц, где n — концентрация частиц (рис. 145). Их общий заряд $q=q_0nS\Delta l$. Если частицы движутся слева направо со средней скоростью v[1], то за время $\Delta t=\frac{\Delta l}{v}$ все частицы заключенные в рассматриваемом объеме, пройдут через сечение *2*. Поэтому сила тока равна:

$$I=\frac{q}{\Delta t}=\frac{q_0nvS\Delta l}{\Delta l}=q_0nvS. \qquad (9.2)$$

В Международной системе единиц силу тока выражают в амперах (А). Эту единицу устанавливают на основе магнитного взаимодействия токов. Измеряют силу тока амперметрами. С принципом устройства этих приборов, основанным на магнитном действии тока, мы познакомимся позднее.

Скорость упорядоченного движения электронов в проводнике. Найдем скорость упорядоченного перемещения электронов в металлическом проводнике.

Согласно формуле (9.2)

$$|v|=\frac{|I|}{enS},$$

где e — модуль заряда электрона. Пусть, например, сила тока $I=1$ А, а площадь поперечного сечения проводника $S=10^{-6}$ м^2. Модуль заряда электрона $e=1{,}6\cdot10^{-19}$ Кл. Число электронов в 1 м^3 меди равно числу атомов в этом объеме, так как один из валентных электронов каждого атома меди коллективизирован и является свободным. Это число есть $n=8{,}5\cdot10^{28}$ м$^{-3}$ (см. задачу № 8 упражнения 1). Следовательно,

$$|v|=\frac{1}{1{,}6\cdot10^{-19}\cdot8{,}5\cdot10^{28}\cdot10^{-6}}\frac{\text{м}}{\text{с}}=7\cdot10^{-5}\text{м/с}.$$

Скорость упорядоченного перемещения электронов, как видите, очень мала.

[1] Точнее, v — проекция средней скорости на положительное направление вдоль проводника.

57. УСЛОВИЯ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ СУЩЕСТВОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Для возникновения и существования постоянного электрического тока в веществе необходимо, во-первых, **наличие свободных заряженных частиц.** Если положительные и отрицательные заряды связаны друг с другом в атомах или молекулах, то их перемещение не приведет к появлению электрического тока.

Но наличие свободных зарядов еще недостаточно для возникновения тока. **Для создания и поддержания упорядоченного движения заряженных частиц необходима,** во-вторых, **сила, действующая на них в определенном направлении.** Если эта сила перестанет действовать, то упорядоченное движение заряженных частиц прекратится из-за сопротивления, оказываемого их движению ионами кристаллической решетки металлов или нейтральными молекулами электролитов.

На заряженные частицы, как мы знаем, действует электрическое поле с силой $\vec{F}=q\vec{E}$. *Обычно именно электрическое поле внутри проводника служит причиной, вызывающей и поддерживающей упорядоченное движение заряженных частиц.* Только в статическом случае, когда заряды покоятся, электрическое поле внутри проводника равно нулю.

Если внутри проводника имеется электрическое поле, то между концами проводника, в соответствии с формулой (8.28), существует разность потенциалов. Когда эта разность потенциалов не меняется во времени, то в проводнике устанавливается постоянный ток. Вдоль проводника потенциал уменьшается от максимального значения на одном конце проводника до минимального — на другом. Это уменьшение потенциала можно обнаружить на простом опыте.

В качестве проводника возьмем не очень сухую деревянную палку и подвесим ее горизонтально. (Такая палка, хотя и плохо, но все же проводит ток.) Источником напряжения пусть будет электростатическая машина. Для регистрации потенциала различных участков проводника относительно земли можно исполь-

Рис. 146

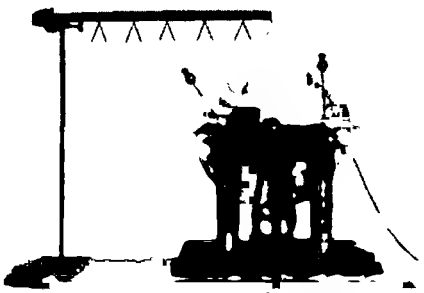
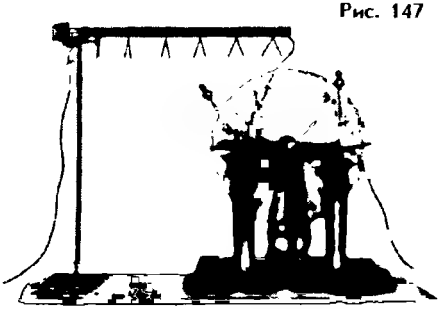


Рис. 147



зовать листочки металлической фольги, прикрепленные к палке. Один полюс машины соединим с землей, а второй — с одним концом проводника (палки). Цепь окажется незамкнутой. При вращении рукоятки машины мы обнаружим, что все листочки отклоняются на один и тот же угол (рис. 146). Значит, потенциал всех точек проводника относительно земли одинаков. Так и должно быть при равновесии зарядов на проводнике. Если теперь другой конец палки заземлить, то при вращении рукоятки машины картина изменится. (Так как земля — проводник, то заземление проводника делает цепь замкнутой.) У заземленного конца листочки вообще не разойдутся: потенциал этого конца проводника практически равен потенциалу земли (падение потенциала в металлической проволоке мало). Максимальный угол расхождения листочков будет у конца проводника, присоединенного к машине (рис. 147). Уменьшение угла расхождения листочков по мере удаления от машины свидетельствует о падении потенциала вдоль проводника.

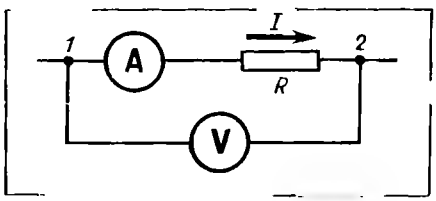
? **1. Что называют электрическим током? 2. Что называют силой тока? 3. Какое направление тока принимают за положительное? 4. Какие условия необходимы для существования электрического тока?**

58. ЗАКОН ОМА ДЛЯ УЧАСТКА ЦЕПИ. СОПРОТИВЛЕНИЕ

Вольт-амперная характеристика. В предыдущем параграфе было установлено, что для существования тока в проводнике необходимо создать разность потенциалов на его концах. Сила тока в проводнике определяется этой разностью потенциалов. Чем больше разность потенциалов, тем больше напряженность электрического поля в проводнике и, следовательно, тем бóльшую скорость направленного движения приобретают заряженные частицы. Согласно (9.2) это означает увеличение силы тока.

Для каждого проводника — твердого, жидкого и газообразного — существует определенная зависимость силы тока от приложенной разности потенциалов. Эту зависимость выражает так называемая вольт-амперная характеристика проводника. Ее находят, измеряя силу тока в проводнике при различных значениях напряжения. Знание вольт-амперной характеристики играет большую роль при рассмотрении всех явлений, связанных с прохождением тока.

Рис. 148



Закон Ома. Наиболее простой вид имеет вольт-ам-

Ом Георг Симон (1787—1854) — выдающийся немецкий физик. Работал школьным учителем. Он открыл закон зависимости силы тока от напряжения для участка цепи, а также закон, определяющий силу тока в замкнутой цепи. Чувствительный прибор для измерения силы тока он изготовил сам. В качестве источника напряжения Ом использовал термопару: два спаянных вместе проводника из различных металлов. Увеличивая разность температур спаев, Ом менял напряжение, которое пропорционально этой разности температур. Кроме того, Ом нашел зависимость сопротивления проводника от длины и площади его поперечного сечения.

перная характеристика металлических проводников и растворов электролитов. Впервые (для металлов) ее установил немецкий ученый Георг Ом. Поэтому зависимость силы тока от напряжения носит название закона Ома. Закон Ома подробно изучался в VII классе, но он столь важен, что его необходимо повторить.

На участке цепи, изображенном на рисунке 148, ток направлен от точки *1* к точке *2*. Разность потенциалов (напряжение) на концах проводника равна: $U=\varphi_1-\varphi_2$. Так как ток направлен слева направо, то напряженность электрического поля направлена в ту же сторону и $\varphi_1>\varphi_2$.

Согласно закону Ома для участка цепи сила тока прямо пропорциональна приложенному напряжению U и обратно пропорциональна сопротивлению проводника R:

$$I=\frac{U}{R}. \qquad (9.3)$$

Закон Ома имеет очень простую форму, но доказать экспериментально его справедливость довольно трудно. Дело в том, что разность потенциалов на участке металлического проводника даже при большой силе тока мала, так как мало сопротивление проводника. Электрометр, о котором шла речь в § 52, непригоден для измерения столь малых напряжений: его чувствительность слишком мала. Нужен несравненно более чувствительный прибор. Применение же обычных приборов для измерения напряжения — вольтметров — основано на использовании закона Ома.

Принцип устройства вольтметра такой же, как и амперметра. Угол поворота стрелки прибора пропорционален силе тока. Сила тока, проходящего по вольтметру, определяется напряжением между точками цепи, к которой он подключен. Поэтому, зная

сопротивление вольтметра, можно по силе тока определить напряжение. На практике прибор градуируют так, чтобы он сразу показывал напряжение в вольтах.

Сопротивление. Основная электрическая характеристика проводника — сопротивление. От этой величины зависит сила тока в проводнике при заданном напряжении. Сопротивление проводника представляет собой как бы меру противодействия проводника установлению в нем электрического тока. С помощью закона Ома (9.3) можно определить сопротивление проводника: $R=\frac{U}{I}$. Для этого нужно измерить напряжение и силу тока.

Сопротивление зависит от материала проводника и его геометрических размеров. Сопротивление проводника длиной l с постоянной площадью поперечного сечения S равно:

$$R=\varrho\frac{l}{S},$$

где ϱ — величина, зависящая от рода вещества и его состояния (от температуры в первую очередь). Величину ϱ называют удельным сопротивлением проводника. Удельное сопротивление численно равно сопротивлению проводника, имеющего форму куба с ребром 1 м, если ток направлен вдоль нормали к двум противоположным граням куба.

Единицу сопротивления проводника устанавливают на основе закона Ома и называют ее ом. **Проводник имеет сопротивление 1 Ом, если при разности потенциалов 1 В сила тока в нем 1 А.**

Единицей удельного сопротивления является 1 Ом·м. Удельное сопротивление металлов мало. Диэлектрики обладают очень большим удельным сопротивлением. В таблице на форзаце приведены примеры значений удельного сопротивления некоторых веществ.

Значение закона Ома. Закон Ома определяет силу тока в электрической цепи при заданном напряжении и известном сопротивлении. Тем самым он позволяет рассчитать тепловые, химические и магнитные действия тока, так как они зависят от силы тока. Из закона Ома вытекает, что замыкать обычную осветительную сеть проводником малого сопротивления опасно. Сила тока согласно (9.3) окажется настолько большой, что это может иметь тяжелые последствия.

59. ЗАВИСИМОСТЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

С изменением температуры сопротивление проводника меняется. В этом можно убедиться, если пропустить ток от аккумулятора через стальную спираль, нагреваемую в пламени горелки. Включенный в цепь амперметр покажет уменьшение силы тока по мере повышения температуры спирали.

Если при 0°С сопротивление проводника равно R_0, а при температуре t оно равно R, то относительное изменение сопротивления, как показывает опыт, прямо пропорционально изменению температуры t:

$$\frac{R-R_0}{R_0}=\alpha t. \qquad (9.4)$$

Коэффициент пропорциональности α называют температурным коэффициентом сопротивления. Он характеризует зависимость сопротивления вещества от температуры. *Температурный коэффициент сопротивления равен относительному изменению сопротивления проводника при нагревании на* 1 К. Для всех металлических проводников $\alpha>0$ и незначительно меняется с изменением температуры. Если интервал изменения температуры невелик, то температурный коэффициент можно считать постоянным и равным его среднему значению на этом интервале температур. У чистых металлов $\alpha\approx\frac{1}{273}\text{К}^{-1}$.

У растворов электролитов сопротивление с ростом температуры не увеличивается, а уменьшается. Для них $\alpha<0$. Например, для 10%-ного раствора поваренной соли $\alpha=-0{,}02\ \text{К}^{-1}$.

При нагревании геометрические размеры проводника меняются незначительно. Сопротивление проводника меняется в основном за счет изменения удельного сопротивления. Можно найти зависимость удельного сопротивления от температуры, если в формулу (9.4) подставить значения $R=\varrho\frac{l}{S}$ и $R_0=\varrho_0\frac{l}{S}$. Вычисления приводят к следующему результату:

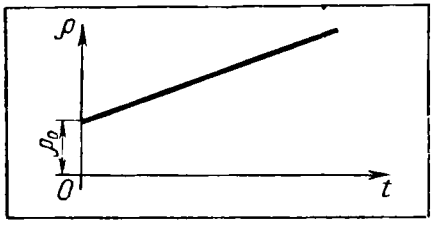
$$\varrho=\varrho_0(1+\alpha t). \qquad (9.5)$$

Так как α мало изменяется при изменении температуры, то можно считать, что удельное сопротивление линейно зависит от температуры (рис. 149).

Хотя коэффициент α довольно мал, учет зависимости сопротивления от температуры при расчете нагревательных приборов совершенно необходим. Так, сопротивление вольфрамовой нити обыкновенной лампы накаливания увеличивается при прохождении по ней тока более чем в 10 раз.

У некоторых сплавов, например у сплава меди с никелем — константана — температурный коэффициент сопротивления очень мал: $\alpha\approx10^{-5}\ \text{К}^{-1}$. Удельное сопротивление константана велико: $\varrho\approx10^{-6}$ Ом·м. Такие сплавы используют для изготовления эталонных со-

Рис. 149



противлений и добавочных сопротивлений к измерительным приборам, т. е. в тех случаях, когда требуется, чтобы сопротивление заметно не менялось при колебаниях температуры.

Зависимость сопротивления металлов от температуры используют в термометрах сопротивления. Обычно в качестве основного рабочего элемента такого термометра берут платиновую проволоку, зависимость сопротивления которой от температуры хорошо известна. Об изменениях температуры судят по изменению сопротивления проволоки, которое можно измерить. Такие термометры позволяют измерять очень низкие и очень высокие температуры, когда обычные жидкостные термометры непригодны.

60. СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

В 1911 г. голландский физик Камерлинг-Оннес открыл замечательное явление — сверхпроводимость. Он обнаружил, что при охлаждении ртути в жидком гелии ее сопротивление сначала меняется постепенно, а затем при температуре 4,1 К очень резко падает до нуля (рис. 150). Это явление было названо сверхпроводимостью. Впоследствии было открыто много других сверхпроводников.

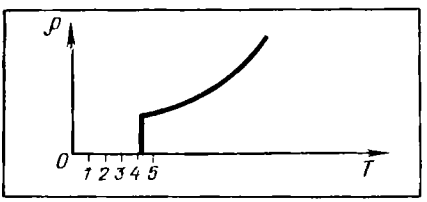
Сверхпроводимость наблюдается при очень низких температурах не выше 25 К. В таблице на форзаце приведены температуры перехода в сверхпроводящее состояние некоторых веществ.

Если в кольцевом проводнике, находящемся в сверхпроводящем состоянии, создать ток, а затем устранить источник, то сила этого тока не меняется сколь угодно долго. В обычном же несверхпроводящем проводнике ток в этом случае быстро прекращается.

Сверхпроводники находят широкое практическое применение. Так, сооружают мощные электромагниты со сверхпроводящей обмоткой, которые создают магнитное поле на протяжении длительных интервалов времени без затрат энергии. Ведь выделения теплоты в сверхпроводящей обмотке не происходит.

Однако получить сколь угодно сильное магнитное поле с помощью сверхпроводящего магнита нельзя. Очень сильное магнитное поле разрушает сверхпроводящее состояние. Такое поле может быть создано током в самом сверхпроводнике. Поэтому для каждого проводника в сверхпроводящем состоянии существует критическое значение силы тока, превзойти которое, не нарушая сверхпроводящего состояния, нельзя.

Рис. 150



Сверхпроводящие магниты используются в ускорителях

элементарных частиц, магнитогидродинамических генераторах (МГД-генераторах), преобразующих механическую энергию струи раскаленного ионизированного газа, движущегося в магнитном поле, в электрическую энергию.

Если бы удалось создать сверхпроводящие материалы при температурах, близких к комнатным, то была бы решена важнейшая техническая проблема — передача энергии по проводам без потерь. В настоящее время физики работают над решением этой проблемы.

Объяснение сверхпроводимости возможно только на основе квантовой теории. Оно было дано лишь в 1957 г.

61. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ

От источника тока энергия может быть передана по проводам к устройствам, потребляющим энергию: электрической лампе, электродвигателю, радиоприемнику и т. д. Для этого составляют электрические цепи различной сложности. Электрическая цепь состоит из источника энергии, устройств, потребляющих электрическую энергию, соединительных проводов и выключателей для замыкания цепи. Часто в электрическую цепь включают приборы, контролирующие силу тока и напряжение на различных участках цепи,— амперметры и вольтметры.

К наиболее простым и часто встречающимся типам соединений проводников относятся последовательное и параллельное соединения.

Последовательное соединение проводников. При последовательном соединении электрическая цепь не имеет разветвлений. Все проводники включают в цепь поочередно друг за другом. На рисунке 151 показано последовательное соединение двух проводников *1* и *2*, имеющих сопротивления R_1 и R_2. Это могут быть две лампы, две обмотки электродвигателя и т. д.

Сила тока в обоих проводниках одинакова:

$$I_1 = I_2 = I, \tag{9.6}$$

так как в проводниках электрический заряд в случае постоянного тока не накапливается и через любое сечение проводника за определенный интервал времени проходит один и тот же заряд.

Напряжение (или разность потенциалов) на концах рассматриваемого участка цепи складывается из напряжений на первом и втором проводниках: $U = U_1 + U_2$.

Применяя закон Ома для всего участка в целом и для участков с сопротивлениями R_1 и R_2, можно доказать, что полное сопротивление при последовательном соединении равно:

$$R = R_1 + R_2. \tag{9.7}$$

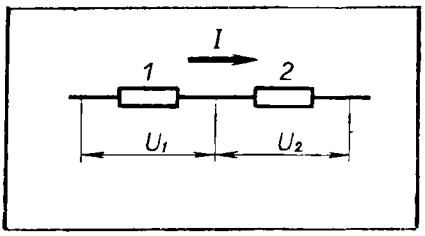


Рис. 151

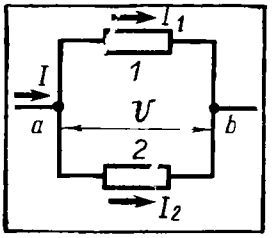


Рис. 152

Аналогичную формулу можно применить для любого числа последовательно соединенных проводников.

Напряжение на проводниках и их сопротивления при последовательном соединении связаны соотношением:

$$\frac{U_1}{U_2}=\frac{R_1}{R_2}. \tag{9.8}$$

Параллельное соединение проводников. На рисунке 152 показано параллельное соединение двух проводников *1* и *2* с сопротивлениями R_1 и R_2. В этом случае электрический ток I разветвляется на две части. Силу тока в первом и втором проводниках обозначим через I_1 и I_2. Так как в точке a — разветвлении проводников (такую точку называют узлом) — электрический заряд не накапливается, то заряд, поступающий в единицу времени в узел, равен заряду, уходящему из узла за это же время. Следовательно,

$$I=I_1+I_2. \tag{9.9}$$

Напряжение U на проводниках, соединенных параллельно, одно и то же.

В осветительной сети поддерживается напряжение 220 или 127 В. На это напряжение рассчитаны приборы, потребляющие электрическую энергию. Поэтому параллельное соединение — самый распространенный способ соединения различных потребителей. В этом случае выход из строя одного прибора не отражается на работе остальных, тогда как при последовательном соединении выход из строя одного прибора размыкает всю цепь.

Применяя закон Ома для участков с сопротивлениями R_1 и R_2, можно доказать, что величина, обратная полному сопротивлению участка ab, равна сумме величин, обратных сопротивлениям отдельных проводников:

$$\frac{1}{R}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}. \tag{9.10}$$

Отсюда следует, что

$$R=\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}. \tag{9.11}$$

Формулы, аналогичные (9.9) и (9.10), можно применять к соединению любого числа проводников.

Силы тока в проводниках и их сопротивления при параллельном соединении связаны соотношением:

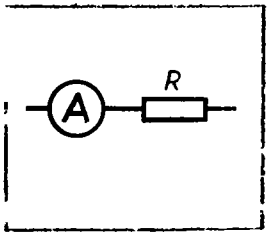
$$\frac{I_1}{I_2}=\frac{R_2}{R_1}. \qquad (9.12)$$

62. ИЗМЕРЕНИЕ СИЛЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

Измерение силы тока. Для измерения силы тока в проводнике амперметр включают последовательно с этим проводником (рис. 153). Но нужно иметь в виду, что сам амперметр обладает некоторым сопротивлением R_a. Поэтому сопротивление участка цепи с включенным амперметром увеличивается, и при неизменном напряжении сила тока уменьшается в соответствии с законом Ома (9.3). Чтобы амперметр оказывал как можно меньшее влияние на силу тока, измеряемого им, его сопротивление делают очень малым. Это нужно помнить и никогда не пытаться «измерить силу тока» в осветительной сети, подключая амперметр к розетке. Произойдет короткое замыкание. Сила тока при малом сопротивлении прибора достигнет столь большой величины, что обмотка амперметра сгорит.

Шунты к амперметру. Любой амперметр рассчитан на измерение сил токов до некоторого максимального значения I_0. Но с помощью подключения параллельно амперметру резистора, называемого шунтом, можно измерить в n раз бóльшую силу тока: $I=nI_0$.

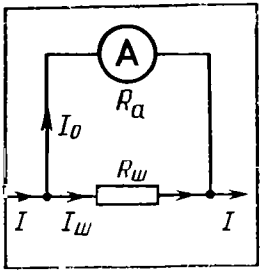
Рис. 153



Найдем сопротивление шунта $R_ш$, необходимого для измерения силы тока, в n раз превышающей силу тока, на которую рассчитан прибор. Сопротивление амперметра обозначим через R_a.

При включении шунта часть измеряемой силы тока $I_ш$ пойдет по нему. Через амперметр должен идти ток, не превышающий I_0 (рис. 154). Сила тока I_0 меньше измеряемой в n раз ($I_0=\frac{I}{n}$). Следовательно, цена деления прибора возрастет в n раз, т. е. отклонению стрелки на одно деление будет соответствовать в n раз бóльшая сила тока. Иначе говоря, чувствительность амперметра уменьшится в n раз: при подключении шунта стрелка прибора отклонится на угол, в n раз меньший, чем без него.

Рис. 154



При параллельном соединении $I=I_0n=I_0+I_ш$, а напряжение на шунте и амперметре одинаково и согласно закону Ома равно: $I_0R_а=I_шR_ш$. Исключая силу тока I_0 из двух последних уравнений, получим:

$$R_ш=\frac{R_0}{n-1}. \qquad (9.13)$$

Измерение напряжения. Для того чтобы измерить напряжение на участке цепи с сопротивлением R, к нему параллельно подключают вольтметр. Напряжение на вольтметре будет совпадать с напряжением на участке (рис. 155).

Если сопротивление вольтметра $R_в$, то после включения его в цепь сопротивление участка будет уже не R, а $R'=\frac{RR_в}{R+R_в}<R$. Из-за этого измеряемое напряжение на участке цепи уменьшится. Для того чтобы вольтметр не вносил заметных искажений в измеряемое напряжение, его сопротивление должно быть большим по сравнению с сопротивлением участка цепи, на котором измеряется напряжение. Вольтметр можно включить в сеть без риска, что он сгорит, если только он рассчитан на напряжение, превышающее напряжение сети.

Добавочные сопротивления к вольтметру. Любой вольтметр рассчитан на предельное напряжение U_0. Но с помощью подключения последовательно с вольтметром добавочного сопротивления $R_д$ можно измерять в n раз бóльшие напряжения: $U=nU_0$. Найдем добавочное сопротивление, необходимое для измерения напряжений в n раз бóльших тех, на которые рассчитан прибор. Сопротивление вольтметра обозначим через $R_в$.

При включении в цепь вольтметра добавочного сопротивления на вольтметр по-прежнему должно приходиться напряжение U_0, но это составляет лишь $\frac{1}{n}$ часть измеряемого напряжения $\left(U_0=\frac{U}{n}\right)$. Остальная часть $(U_д=U-U_0)$ приходится на добавочное сопротивление (рис. 156). Поэтому пределы измерения увеличиваются в n раз и во столько же раз увеличивается цена деления вольтметра, а следовательно, уменьшается его чувствительность.

В вольтметре и добавочном сопротивлении устанавливается

Рис. 155

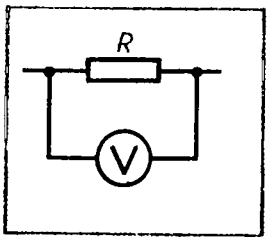


Рис. 156

один и тот же ток. Поэтому $U_0 = IR_a$, $U_д = IR_д$ и $U = U_0 + U_д = IR_в + IR_д = nU_0 = nIR_a$. Отсюда

$$R_д = R_в(n-1). \tag{9.14}$$

63. РАБОТА И МОЩНОСТЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В электрической цепи происходит ряд превращений энергии. При упорядоченном движении заряженных частиц в проводнике электрическое поле совершает работу. Эту работу принято называть работой тока.

Рассмотрим произвольный участок цепи. Это может быть однородный проводник, например нить лампы накаливания, обмотка электродвигателя и т. д. Пусть за время Δt через поперечное сечение проводника проходит заряд Δq. Тогда электрическое поле совершит работу $A = \Delta qU$.

Так как сила тока $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$, то эта работа равна:

$$\boxed{A = IU\Delta t.} \tag{9.15}$$

Работа тока на участке цепи равна произведению силы тока на напряжение и на время, в течение которого совершалась работа.

Согласно закону сохранения энергии эта работа должна быть равна изменению энергии рассматриваемого участка цепи. Поэтому энергия, выделяемая на данном участке цепи за время Δt, равна работе тока (9.15).

В случае если на участке цепи не совершается механическая работа и ток не производит химических действий, происходит только нагревание проводника. Нагретый проводник отдает теплоту окружающим телам.

Нагревание проводника происходит следующим образом. Электрическое поле ускоряет электроны. После столкновения с ионами кристаллической решетки они передают ионам свою энергию. В результате энергия хаотического движения ионов около положений равновесия возрастает. Это и означает увеличение внутренней энергии. Температура проводника повышается, и он начинает передавать теплоту окружающим телам. Спустя небольшое время после замыкания цепи процесс устанавливается и температура перестает изменяться со временем. К проводнику за счет работы электрического поля непрерывно поступает энергия. Но его внутренняя энергия остается неизменной, так как проводник передает окружающим телам количество теплоты, равное работе тока. Таким образом, формула (9.15) для работы тока определяет количество теплоты, передаваемое проводником другим телам.

Если в формуле (9.15) выразить либо напряжение через силу тока, либо силу тока через напряжение с помощью закона Ома для участка цепи, то получим три эквивалентные формулы для работы тока:

$$A = IU\Delta t = I^2R\Delta t = \frac{U^2}{R}\Delta t = Q. \qquad (9.16)$$

Формулой $A = I^2R\Delta t$ удобно пользоваться для последовательного соединения проводников, так как сила тока в этом случае одинакова во всех проводниках. При параллельном соединении удобна формула $A = \frac{U^2}{R}\Delta t$, так как напряжение на всех проводниках одинаково.

Закон, определяющий количество теплоты, которое выделяет проводник с током в окружающую среду, был впервые установлен экспериментально английским ученым Джоулем и русским ученым Ленцем. Закон Джоуля — Ленца был сформулирован следующим образом: **количество теплоты, выделяемое проводником с током, равно произведению квадрата силы тока, сопротивления проводника и времени:**

$$\boxed{Q = I^2R\Delta t.} \qquad (9.17)$$

Мы получили этот закон с помощью рассуждений, основанных на законе сохранения энергии. Формула (9.17) позволяет вычислить количество теплоты, выделяемой на любом участке цепи, содержащем какие угодно проводники.

Любой электрический прибор, лампа, электродвигатель и т. д., рассчитан на потребление определенной энергии в единицу времени. Поэтому наряду с работой тока очень важное значение имеет понятие мощности тока. Мощность тока равна отношению работы тока за время Δt к этому интервалу времени.

Согласно определению мощности

$$P = \frac{A}{\Delta t} = IU. \qquad (9.18)$$

Это выражение для мощности можно переписать в нескольких эквивалентных формах, если использовать закон Ома для участка цепи:

$$P = IU = I^2R = \frac{U^2}{R}.$$

На большинстве приборов указана потребляемая ими мощность.

1. Как формулируется закон Ома? 2. Как изменяется с температурой сопротивление металлов и растворов электролитов? 3. Каковы главные технические трудности использования сверхпроводников на практике? 4. Почему сопротивление амперметра должно быть малым, а вольтметра — большим? 5. Что называют работой тока?

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

При решении задач на применение закона Ома (9.3) надо, кроме самого закона Ома, хорошо представлять себе, что при последовательном соединении сила тока во всех проводниках одинакова, а напряжение на концах цепи равно сумме напряжений на отдельных участках цепи. При параллельном соединении напряжение одинаково на всех проводниках, а сила тока в неразветвленной цепи равна сумме сил токов в отдельных проводниках. Формулы (9.7), (9.8), (9.10) и (9.12) вытекают из закона Ома, но лучше их запомнить и непосредственно применять при решении задач.

При решении задач на работу и мощность тока надо применять формулы (9.16) и (9.18).

1. Сила тока в цепи, содержащей реостат, $I=3{,}2$ А. Напряжение между клеммами реостата $U=14{,}4$ В. Каково сопротивление R той части реостата, в которой существует ток?

Решение. Согласно закону Ома $I=\frac{U}{R}$, отсюда $R=\frac{U}{I}$; $R=4{,}5$ Ом.

2. Устройство, предназначенное для подачи на вход электрической цепи произвольной части U данного постоянного напряжения U_0, называется делителем напряжения. Обычно его изготовляют из проводника, обладающего большим удельным сопротивлением, и снабжают скользящим контактом для плавной регулировки напряжения U.

Такой делитель напряжения называется потенциометром. Схема его включения изображена на рисунке 157. Сопротивление проводника AB $R_0=4$ кОм, напряжение $U_0=220$ В. Между скользящим контактом D и клеммой A потенциометра включена нагрузка (потребитель), обладающая сопротивлением $R=10$ кОм.

Определить напряжение U на нагрузке, когда скользящий контакт D установлен так, что делит проводник AB на две равные части.

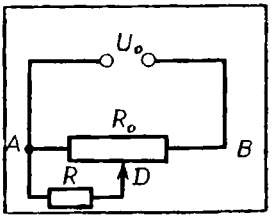
Решение. В цепи имеются два последовательно соединенных участка: участок AD, состоящий из половины проводника AB (сопротивлением $R_0/2$) и нагрузки (сопротивлением R), соединенных параллельно, и участок DB, сопротивление которого равно $R_0/2$. Сопротивление участка AD равно:

$$R_{AD}=\frac{\frac{R_0}{2}R}{\frac{R_0}{2}+R}=\frac{R_0R}{R_0+2R}.$$

Общее сопротивление цепи:

$$R_{AB}=R_{AD}+\frac{R_0}{2}=\frac{2R_{AD}+R_0}{2}.$$

Рис. 157



Сила тока в цепи:

$$I=\frac{U_0}{R_{AB}}=\frac{2U_0}{2R_{AD}+R_0}.$$

Искомое напряжение:

$$U=IR_{AD}=\frac{2U_0R_{AD}}{2R_{AD}+R_0}=\frac{2U_0R}{R_0+4R};\quad U=100\text{ В}.$$

Упр. 11

1. Электроны, летящие к экрану телевизионной трубки, образуют электронный пучок. В какую сторону направлен ток в пучке?

2. Почему в опытах, описанных в § 57, для наблюдения падения потенциала вдоль проводника использовали деревянную палку, а не металлический проводник?

3. Определить площадь поперечного сечения и длину медного проводника, если его сопротивление 0,2 Ом, а масса 0,2 кг. Плотность меди 8900 кг/м^3.

4. Гальванометр, внутреннее сопротивление которого 600 Ом, зашунтирован сопротивлением 25 Ом. Во сколько раз изменилась цена деления гальванометра?

5. Вольтметром, внутреннее сопротивление которого $R_в=1000$ Ом, рассчитанным на предельное напряжение $U_0=150$ В, необходимо измерить в шесть раз большее напряжение $U=900$ В. Какое добавочное сопротивление придется включить последовательно с вольтметром, чтобы осуществить измерение?

6. К концам медного проводника длиной 300 м приложено напряжение 36 В. Найти среднюю скорость упорядоченного движения электронов в проводнике, если концентрация электронов проводимости в меди $8{,}5\cdot10^{28}$ м$^{-3}$.

7. Как убедиться, что в кольцевом сверхпроводнике действительно устанавливается неизменный ток?

8. Длинная проволока, на концах которой поддерживается постоянное напряжение, накалилась докрасна. Часть проволоки опустили в холодную воду. Почему часть проволоки, оставшаяся над водой, нагревается сильнее?

9. Спираль электрической плитки перегорела и после соединения концов оказалась несколько короче. Как изменилось количество теплоты, выделяемое плиткой за определенное время?

10. За некоторый промежуток времени электрическая плитка, включенная в сеть с постоянным напряжением, выделила количество теплоты Q. Какое количество теплоты выделят за то же время две такие плитки, включенные в ту же сеть последовательно? параллельно?

11. Алюминиевая обмотка электромагнита при 0°С потребляет мощность 5 кВт. Какой окажется потребляемая мощность, если во время работы температура обмотки повысилась до 60°С, а напряжение осталось неизменным? Ответить на этот же вопрос, если в обмотке ток поддерживается неизменным.

12. На изготовление трехмиллионного тиража учебника «Физика-9» идет 1200 т бумаги, для выработки которой нужно 840 000 кВт·ч электроэнергии. Масштаб этих чисел можно оценить на следующем примере.

Электровоз, тянущий состав такой массы и потребивший столько электроэнергии за 7 сут., пройдет расстояние 7500 км.

Каков КПД электровоза и сила тока в его двигателях, если напряжение контактной сети 3000 В, а сила тяги электровоза составляет приблизительно 1/30 от веса состава?

64. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА

Если соединить проводником два металлических шарика, несущих заряды противоположных знаков, то под влиянием электрического поля этих зарядов в проводнике возникает электрический ток (рис. 158). Но этот ток будет очень кратковременным. Заряды быстро нейтрализуются, разность потенциалов между шариками выравнится и напряженность электрического поля станет равной нулю.

Сторонние силы. Для того чтобы ток был постоянным, надо поддерживать постоянное напряжение между шариками. А для этого необходимо устройство (источник тока), которое перемещало бы заряды от одного шарика к другому в направлении, противоположном направлению сил, действующих на эти заряды со стороны электрического поля шариков. В таком устройстве на заряды должны действовать силы неэлектростатического происхождения (рис. 159). Одно лишь электрическое поле заряженных частиц (кулоновское поле) не способно поддерживать постоянный ток в цепи.

Любые силы, действующие на электрически заряженные частицы, за исключением сил электростатического происхождения (т. е. кулоновских), называют сторонними силами.

Вывод о необходимости сторонних сил для поддержания постоянного тока в цепи станет еще очевиднее, если обратиться к закону сохранения энергии. Электростатическое поле потенциаль-

Рис. 158

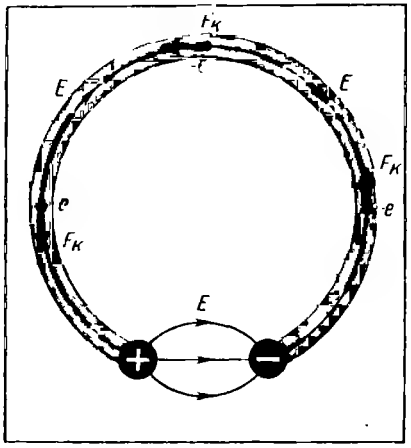
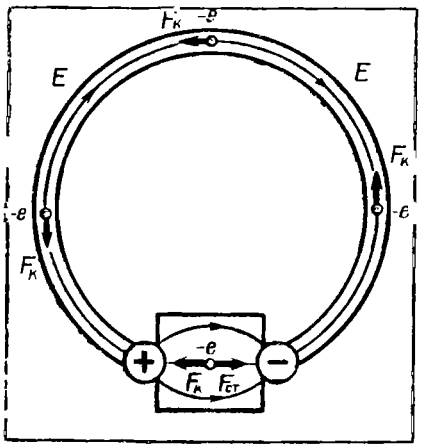


Рис. 159



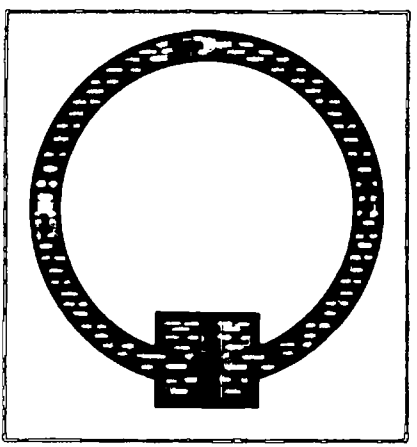
но. Работа этого поля по перемещению заряженных частиц вдоль замкнутой электрической цепи равна нулю. Прохождение же тока по проводникам сопровождается выделением энергии — проводник нагревается. Следовательно, в любой цепи должен быть какой-то источник энергии, поставляющий ее в цепь. В этом источнике, помимо кулоновских сил, обязательно должны действовать сторонние, не потенциальные силы. Работа этих сил вдоль замкнутого контура должна быть отлична от нуля. Именно в процессе совершения работы этими силами заряженные частицы приобретают внутри источника тока энергию и отдают ее затем при движении в проводниках электрической цепи.

Сторонние силы приводят в движение заряженные частицы внутри всех источников тока: генераторов на электростанциях, гальванических элементов, аккумуляторов и т. д.

При замыкании цепи создается электрическое поле во всех проводниках цепи. Внутри источника заряды движутся под действием сторонних сил против кулоновских сил (отрицательные — от плюса к минусу), а во всей остальной цепи их приводит в движение электрическое поле (рис. 159).

Аналогия между электрическим током и течением жидкости. Чтобы лучше понять это, обратимся к аналогии между электрическим током в проводнике и течением жидкости по трубам. На любом участке горизонтальной трубы жидкость течет за счет разности давлений на концах участка. Жидкость перемещается в сторону уменьшения давления. Но сила давления в жидкости — это вид сил упругости, которые являются потенциальными, подобно кулоновским силам. Поэтому работа этих сил на замкнутом пути равна нулю и одни эти силы не способны вызвать длительную циркуляцию жидкости по трубам. Течение жидкости сопровождается потерями энергии вследствие действия сил трения. Для циркуляции воды необходим насос. Поршень этого насоса действует на частички жидкости и создает постоянную разность давлений на входе и выходе насоса (рис. 160). Благодаря этому жидкость течет по трубе. Насос является аналогом источника тока, а роль сторонних сил играет сила, действующая на воду со стороны движущегося поршня. Внутри насоса жидкость течет от участков с меньшим давлением к участкам с бо́льшим давлением.

Рис. 160



Природа сторонних сил. Природа сторонних сил может быть разнообразной. В генера-

торах электростанций сторонняя сила — это сила, действующая со стороны магнитного поля на электроны в движущемся проводнике. Об этом кратко говорилось в курсе физики VII класса.

В гальваническом элементе, например элементе Вольта, действуют химические силы электромагнитной природы. Элемент Вольта состоит из цинкового и медного электродов, помещенных в раствор серной кислоты. Химические силы вызывают растворение цинка в кислоте. В раствор переходят положительно заряженные ионы цинка, а сам цинковый электрод заряжается отрицательно. Медь очень мало растворяется в серной кислоте. Поэтому между цинковым и медным электродами появляется разность потенциалов, которая обусловливает ток в замкнутой электрической цепи.

Электродвижущая сила. Действие сторонних сил характеризуется важной физической величиной, называемой электродвижущей силой (сокращенно ЭДС). **Электродвижущая сила в замкнутом контуре представляет собой отношение работы сторонних сил по перемещению заряда вдоль контура к заряду**[1]:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{ст}}{\Delta q}. \qquad (9.19)$$

Как и разность потенциалов, электродвижущую силу выражают в вольтах.

Можно говорить об электродвижущей силе на любом участке цепи. Это удельная работа сторонних сил (работа по перемещению единичного заряда) не во всем контуре, а только на данном участке. Электродвижущая сила гальванического элемента есть работа сторонних сил при перемещении единичного положительного заряда внутри элемента от одного полюса к другому. Следует подчеркнуть еще раз, что работа сторонних сил не может быть выражена через разность потенциалов, так как сторонние силы не потенциальны и их работа зависит от формы траектории. Так, например, работа сторонних сил при перемещении заряда между клеммами источника тока вне самого источника равна нулю.

Так как электродвижущая сила представляет собой удельную работу, то она является скалярной величиной, которая может быть как положительной, так и отрицательной.

65. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ЗАМКНУТОЙ ЦЕПИ

Рассмотрим простейшую замкнутую цепь, состоящую из источника (гальванического элемента, аккумулятора или генератора)

[1] Как видно из определения, ЭДС численно равна работе по перемещению единичного положительного заряда, а не силе в обычном понимании этого слова. Здесь опять используется не очень удачная, но давно установившаяся терминология.

и резистора сопротивлением R (рис. 161). Источник тока имеет ЭДС $\mathcal{E}$ и сопротивление r. Сопротивление источника часто называют внутренним сопротивлением в отличие от внешнего сопротивления R цепи. В генераторе r — это сопротивление обмоток, а в гальваническом элементе — сопротивление раствора электролита и электродов.

Закон Ома для замкнутой цепи связывает силу тока в цепи, ЭДС и полное сопротивление $R+r$ цепи. Эта связь может быть установлена теоретически, если использовать закон сохранения энергии и закон Джоуля — Ленца (9.17).

Пусть за время Δt через поперечное сечение проводника пройдет заряд Δq. Тогда работу сторонних сил по перемещению заряда Δq можно записать так: $A_{ст}=\mathcal{E}\,\Delta q$. Согласно определению силы тока (9.1) $\Delta q=I\Delta t$. Поэтому

$$A_{ст}=\mathcal{E}\,I\Delta t. \tag{9.20}$$

При совершении этой работы на внутреннем и внешнем участках цепи, сопротивления которых r и R, выделяется некоторое количество теплоты. По закону Джоуля — Ленца оно равно:

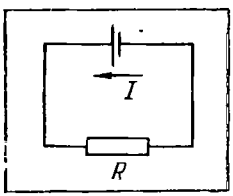
$$Q=I^2R\Delta t+I^2r\Delta t. \tag{9.21}$$

Согласно закону сохранения энергии $A=Q$. Приравнивая (9.20) и (9.21), получим:

$$\mathcal{E}=IR+Ir. \tag{9.22}$$

Произведение силы тока на сопротивление участка цепи часто называют *падением напряжения на этом участке*. Таким образом, ЭДС равна сумме падений напряжений на внутреннем и внешнем участках замкнутой цепи.

Рис. 161

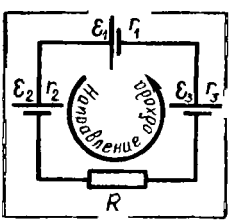


Обычно закон Ома для замкнутой цепи записывают в форме:

$$I=\frac{\mathcal{E}}{R+r}. \tag{9.23}$$

Сила тока в замкнутой цепи равна отношению ЭДС цепи к ее полному сопротивлению.

Рис. 162



Сила тока зависит от трех величин: ЭДС $\mathcal{E}$, сопротивлений R и r внешнего и внутреннего участков цепи. Внутреннее сопротивление источника тока не оказывает заметного влияния на силу тока, если оно мало по сравнению с сопротивлением внешней части цепи ($R\gg r$). При этом напряжение на зажимах источника приблизительно равно ЭДС: $U=IR\approx\mathcal{E}$.

Но при коротком замыкании ($R \to 0$) сила тока в цепи определяется именно внутренним сопротивлением источника и может при электродвижущей силе в несколько вольт быть очень большой, если r мало (например, у аккумулятора $r \approx 0{,}1 - 0{,}001$ Ом). Провода могут расплавиться, а сам источник — выйти из строя.

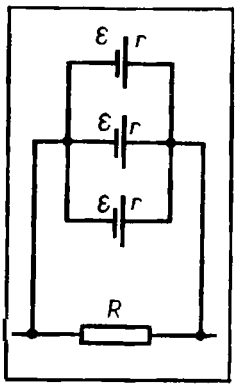


Рис. 163

Если цепь содержит несколько последовательно соединенных элементов с ЭДС $\mathcal{E}_1$, $\mathcal{E}_2$, $\mathcal{E}_3$ и т. д., то *полная ЭДС цепи равна алгебраической сумме ЭДС отдельных элементов*. Для определения знака ЭДС любого источника нужно вначале условиться относительно выбора положительного направления обхода контура. На рисунке 162 положительным (произвольно) считают направление обхода против часовой стрелки.

Если при обходе цепи переходят от отрицательного полюса источника к положительному, то ЭДС $\mathcal{E} > 0$. Сторонние силы внутри источника совершают при этом положительную работу. Если же при обходе цепи переходят от положительного полюса источника к отрицательному, ЭДС будет отрицательной. Сторонние силы внутри источника совершают отрицательную работу. Так, для цепи, изображенной на рисунке 162:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 = |\mathcal{E}_1| - |\mathcal{E}_2| + |\mathcal{E}_3|.$$

Если $\mathcal{E} > 0$, то согласно (9.23) сила тока $I > 0$, т. е. направление тока совпадает с направлением обхода контура. При $\mathcal{E} < 0$, наоборот, направление тока противоположно направлению обхода контура. Полное сопротивление цепи R_n равно сумме всех сопротивлений: $R_n = R + r_1 + r_2 + r_3$.

При параллельном соединении гальванических элементов с одинаковыми ЭДС (или других источников) ЭДС батареи равна ЭДС одного из элементов (рис. 163). Внутреннее же сопротивление батареи рассчитывают по обычному правилу параллельного соединения проводников. Для цепи, изображенной на рисунке 163, согласно закону Ома для замкнутой цепи сила тока определяется следующей формулой:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + \frac{r}{3}}.$$

1. Почему электрическое поле заряженных частиц (кулоновское поле) не способно поддерживать постоянный электрический ток в цепи? **2.** Что называют сторонними силами? **3.** Что называют электродвижущей силой? **4.** Сформулируйте закон Ома для замкнутой цепи. **5.** От чего зависит знак ЭДС в законе Ома для замкнутой цепи?

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

В задачах с использованием ЭДС надо знать закон Ома для замкнутой цепи (9.23) и уметь правильно расставлять знаки ЭДС в этом законе для цепи с несколькими источниками тока. Кроме того, во многих задачах надо использовать закон Ома для участка цепи (9.3) и выражения (9.16), (9.18) для работы и мощности тока.

1. Аккумулятор с ЭДС $|\mathcal{E}|=6$ В и внутренним сопротивлением $r=0{,}1$ Ом питает внешнюю цепь сопротивлением $R=12{,}4$ Ом. Какое количество теплоты Q выделится за время $t=10$ мин во всей цепи?

Решение. Согласно закону Ома для замкнутой цепи ток в цепи равен: $I=\dfrac{\mathcal{E}}{R+r}$. Количество теплоты, выделившееся на внешнем участке цепи, равно: $Q_1=I^2Rt$, на внутреннем: $Q_2=I^2rt$. Полное количество теплоты равно:

$$Q=Q_1+Q_2=I^2(R+r)t=\frac{\mathcal{E}^2t}{R+r};\quad Q=1728\text{ Дж}.$$

2. Гальванический элемент с ЭДС $|\mathcal{E}|=5$ В и внутренним сопротивлением $r=0{,}2$ Ом замкнут на внешнее сопротивление $R=40$ Ом. Чему равно напряжение U на внешнем сопротивлении?

Решение. Согласно закону Ома для участка цепи $U=IR$. Сила тока в замкнутой цепи $I=\dfrac{\mathcal{E}}{R+r}$. Отсюда $U=\dfrac{\mathcal{E}R}{R+r}$; $U\approx 4{,}8$ В.

Упр. 12

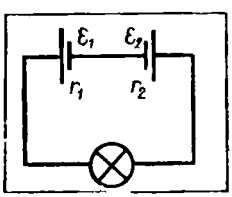
1. Чему равно напряжение на клеммах гальванического элемента с ЭДС, равной $\mathcal{E}$, если цепь разомкнута?

2. Чему равна сила тока при коротком замыкании аккумулятора с ЭДС $|\mathcal{E}|=12$ В и внутренним сопротивлением $r=0{,}01$ Ом?

3. Батарейка для карманного фонаря замкнута на реостат. При сопротивлении реостата 1,65 Ом напряжение на нем равно 3,30 В, а при сопротивлении 3,50 Ом — 3,50 В. Найти ЭДС и внутреннее сопротивление батарейки.

4. Гальванические элементы с ЭДС 4,50 и 1,50 В и внутренними сопротивлениями 1,50 и 0,50 Ом, соединенные, как показано на рисунке 164, питают лампу от карманного фонаря. Какую мощность потребляет лампа, если известно, что сопротивление ее нити в нагретом состоянии равно 23 Ом?

Рис. 164



5. Замкнутая цепь питается от источника с ЭДС 6 В и внутренним сопротивлением 0,1 Ом. Построить графики зависимости силы тока в цепи и напряжения на зажимах источника от сопротивления внешнего участка.

6. Два элемента, имеющие одинаковые ЭДС по 4,1 В, но разные внутренние сопротивления по 4 и 6 Ом, соединены одноименными полюсами, от которых сделаны выводы. Какую ЭДС и какое внутреннее сопротивление должен иметь элемент, которым можно было бы заменить такую батарею?

КРАТКИЕ ИТОГИ ГЛАВЫ IX

Направленное (упорядоченное) движение заряженных частиц называют электрическим током. Сила тока равна отношению заряда Δq, переносимого через поперечное сечение проводника за интервал времени Δt, к этому интервалу: $I=\frac{\Delta q}{\Delta t}$

Силу тока измеряют в амперах. Согласно закону Ома для участка цепи

$$I=\frac{U}{R},$$

где U — напряжение на концах участка цепи, а R — сопротивление цепи. Сопротивление измеряют в омах: 1 Ом$=\frac{1\text{ В}}{1\text{ А}}$

Сопротивление металлических проводников увеличивается с увеличением температуры приблизительно линейно. Ряд чистых металлов и сплавов при температурах, близких к абсолютному нулю, полностью теряют сопротивление. Это явление называют сверхпроводимостью.

При упорядоченном движении заряженных частиц в проводнике электрическое поле совершает работу, называемую работой тока. Работа тока за время Δt на участке проводника

$$A=IU\Delta t.$$

Количество теплоты, выделенной в проводнике с током, согласно закону Джоуля — Ленца равно:

$$Q=I^2R\Delta t.$$

Мощность тока $P=\frac{A}{\Delta t}=IU.$

Потенциальные силы кулоновского поля не могут поддерживать постоянный ток в замкнутой цепи, так как не совершают работы при перемещении заряженных частиц вдоль замкнутого контура. В цепи должны существовать непотенциальные сторонние силы той или иной природы. Они действуют внутри источника тока, включаемого в цепь.

Отношение работы сторонних сил по перемещению заряда Δq вдоль замкнутого контура к этому заряду называют электродвижущей силой:

$$\mathcal{E}=\frac{A_{ст}}{\Delta q}$$

Сила тока в замкнутой цепи равна отношению ЭДС цепи к ее полному сопротивлению:

$$I=\frac{\mathcal{E}}{R+r}$$

Глава X.
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

66. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОВОДИМОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ

Мы довольно подробно рассмотрели электрический ток в металлических проводниках, познакомились с установленной экспериментально вольт-амперной характеристикой этих проводников — законом Ома. Металлические проводники находят широчайшее применение в передаче электроэнергии от источников тока к потребителям. Кроме того, эти проводники используются в электродвигателях и генераторах, электронагревательных приборах и т. д.

Наряду с металлами хорошими проводниками, т. е. *веществами с большим количеством свободных заряженных частиц,* являются водные растворы или расплавы электролитов и ионизированный газ — плазма. Эти проводники также широко используются в технике. В вакуумных электронных приборах электрический ток образуют потоки электронов.

Кроме проводников и диэлектриков — *веществ с небольшим количеством свободных заряженных частиц,* имеется группа веществ, проводимость которых занимает промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Эти вещества не настолько хорошо проводят электричество, чтобы их назвать проводниками, и не настолько плохо, чтобы их отнести к диэлектрикам. Поэтому они получили название полупроводников.

До недавнего времени полупроводники не играли заметной практической роли. В электротехнике и радиотехнике применяли исключительно различные проводники и диэлектрики. Положение существенно изменилось, можно даже сказать, что в радиотехнике произошла революция, когда сначала теоретически, а затем экспериментально была открыта и изучена легко осуществимая возможность управления электрической проводимостью полупроводников.

Конечно, для передачи электрической энергии по проводам по-прежнему применяют проводники. Полупроводники же применяют в качестве элементов, преобразующих ток в радиоприемниках, вычислительных машинах и т. д.

В этой главе мы познакомимся с физическими процессами, обусловливающими прохождение электрического тока в различных средах. Начнем с металлических проводников. Вольт-амперная характеристика этих проводников нам известна, но пока ничего не говорилось об ее объяснении с точки зрения молекулярно-кинетической теории.

Мандельштам Леонид Исаакович (1879—1944) — один из крупнейших советских физиков, академик Л. И. Мандельштам внес большой вклад в развитие теории колебаний, радиофизики и оптики. Совместно с Г. С. Ландсбергом им было открыто рассеяние света кристаллами, сопровождающееся изменением частоты (так называемое комбинационное рассеяние). Л. И. Мандельштам создал целое научное направление в советской физике. Его учениками являются академики А. А. Андронов, М. А. Леонтович, профессора С. М. Рытов, С. П. Стрелков и многие другие.

67. ЭЛЕКТРОННАЯ ПРОВОДИМОСТЬ МЕТАЛЛОВ

Носителями свободного заряда в металлах являются электроны. Эти электроны участвуют в хаотическом тепловом движении. Под действием электрического поля они начинают перемещаться упорядоченно со средней скоростью порядка 10^{-4} м/с (см. § 56).

Экспериментальное доказательство существования свободных электронов в металлах. Экспериментальное доказательство того, что проводимость металлов обусловлена движением свободных электронов, было дано в опытах Л. И. Мандельштама и Н. Д. Папалекси (в 1913 г.), Стюартом и Толменом (в 1916 г.).

Схема этих опытов такова. На катушку наматывают проволоку, концы которой припаивают к двум металлическим дискам, изолированным друг от друга (рис. 165). К концам дисков при помощи скользящих контактов присоединяют гальванометр.

Катушку приводят в быстрое вращение, а затем резко останавливают. После резкой остановки катушки свободные заряженные частицы будут некоторое время двигаться относительно проводника по инерции, и, следовательно, в катушке возникнет электрический ток. Ток будет длиться небольшое время, так как из-за сопротивления проводника заряженные частицы тормозятся и упорядоченное движение частиц, образующее ток, прекращается.

Наблюдения показали, что в цепи после остановки катушки некоторое время существует ток. Направление его говорит о том, что он создается движением отрицательно заряженных частиц. Переносимый при этом заряд пропорционален отношению заряда частиц, создающих ток, к их массе, т. е. e/m. Поэтому, измеряя

Рис. 165

заряд, проходящий через гальванометр за все время существования тока в цепи, удалось определить отношение e/m. Оно оказалось равным $1{,}8 \cdot 10^{11}$ Кл/кг. Эта величина совпадает с отношением заряда к массе для электрона, найденным ранее из других опытов.

Движение электронов в металле. Электроны под влиянием постоянной силы, действующей на них со стороны электрического поля, приобретают определенную скорость упорядоченного движения. Эта скорость не увеличивается в дальнейшем со временем, так как со стороны ионов кристаллической решетки на электроны действует некоторая тормозящая сила. Эта сила подобна силе сопротивления, действующей на камень, когда он тонет в воде. В результате средняя скорость упорядоченного движения электронов пропорциональна напряженности электрического поля в проводнике $v \sim E$ и, следовательно, разности потенциалов на концах проводника, так как $E = \frac{U}{l}$, где l — длина проводника.

Мы знаем, что сила тока в проводнике пропорциональна скорости упорядоченного движения частиц (см. формулу 9.2). Поэтому можем сказать, что сила тока пропорциональна разности потенциалов на концах проводника $I \sim U$. В этом состоит качественное объяснение закона Ома на основе электронной теории проводимости металлов.

Построить удовлетворительную количественную теорию движения электронов в металле на основе законов классической механики невозможно. Дело в том, что условия движения электронов в металле таковы, что классическая механика Ньютона неприменима для описания этого движения. Наиболее наглядно это видно из следующего примера. Если экспериментально определить среднюю кинетическую энергию теплового движения электронов в металле при комнатной температуре и найти соответствующую этой энергии температуру по формуле $\frac{m\overline{v^2}}{2} = \frac{3}{2}kT$, то получится температура порядка $10^5 - 10^6$ К. Такая температура существует внутри звезд. Движение электронов в металле подчиняется законам квантовой механики (законы классической механики Ньютона в этом случае неприменимы).

1. Перечислите вещества, являющиеся хорошими проводниками электрического тока. 2. Катушка в опыте, изображенном на рисунке 165, вращалась по часовой стрелке, а затем была резко заторможена. Определите направление электрического тока в катушке в момент торможения. 3. Как скорость упорядоченного движения электронов в металлическом проводнике зависит от напряжения на концах проводника?

68. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ЖИДКОСТЯХ

Жидкости, как и твердые тела, могут быть диэлектриками, проводниками и полупроводниками. К числу диэлектриков относится дистиллированная вода, к проводникам относятся растворы электролитов: кислот, щелочей и солей. Жидкими полупроводниками являются, например, расплавленный селен, расплавы сульфидов.

Электролитическая диссоциация. В курсе неорганической химии IX класса подробно рассказано, почему водные растворы электролитов проводят электрический ток. При растворении электролитов под влиянием электрического поля полярных молекул воды происходит распад молекул электролитов на отдельные ионы. Этот процесс называется электролитической диссоциацией.

Степень диссоциации, т. е. доля молекул растворенного вещества, которые распадаются на ионы, зависит от температуры, концентрации раствора и диэлектрической проницаемости ε растворителя. С увеличением температуры степень диссоциации возрастает и, следовательно, увеличивается концентрация положительно и отрицательно заряженных ионов.

Ионы разных знаков при встрече могут снова объединиться в нейтральные молекулы — рекомбинировать (воссоединиться). При неизменных условиях в растворе устанавливается динамическое равновесие, при котором число молекул, распадающихся за секунду на ионы, равно числу пар ионов, которые за то же время вновь воссоединяются в нейтральные молекулы.

Ионная проводимость. Носителями заряда в водных растворах или расплавах электролитов являются положительно и отрицательно заряженные ионы.

Если сосуд с раствором электролита включить в электрическую цепь, то отрицательные ионы начнут двигаться к положительному электроду — аноду, а положительные — к отрицательному — катоду. В результате установится электрический ток. Поскольку перенос заряда в водных растворах или расплавах электролитов осуществляется ионами, такую проводимость называют ионной.

Жидкости могут обладать и электронной проводимостью. Такой проводимостью обладают, например, жидкие металлы.

Электролиз. При ионной проводимости прохождение тока связано с переносом вещества. На электродах происходит выделение веществ, входящих в состав электролитов. На аноде отрицательно заряженные ионы отдают свои лишние электроны (в химии это называется окислительной реакцией), а на катоде положительные ионы получают недостающие электроны (восстановительная реакция). Процесс выделения на электродах веществ, связанный с окислительно-восстановительными реакциями, называют электролизом.

Применения электролиза. Электролиз широко применяют в технике для различных целей. Электролитическим путем покрывают поверхности одного металла тонким слоем другого (никелирование, хромирование, омеднение и т. п.). Это прочное покрытие защищает поверхность от коррозии.

Если принять меры к тому, чтобы электролитическое покрытие хорошо отслаивалось от поверхности, на которую осаждался металл (этого достигают, например, нанося на поверхность графит), можно получить копию с рельефной поверхности.

В полиграфической промышленности такие копии (стереотипы) получают с матриц (оттиска набора на пластичном материале). Для этого осаждают на матрицах толстый слой железа или другого материала. Это позволяет воспроизвести набор в нужном количестве экземпляров. Если раньше тираж книги ограничивался числом оттисков, которые можно получить с одного набора (при печатании набор стирается), то сейчас использование стереотипов позволяет значительно увеличить тираж.

Правда, в настоящее время с помощью электролиза получают стереотипы только для книг высококачественной печати и с большим числом иллюстраций.

Процесс получения отслаиваемых покрытий (гальванопластика) был разработан русским ученым Б. С. Якоби, который в 1836 г. применил этот способ для изготовления полых фигур для Исаакиевского собора в Ленинграде.

При помощи электролиза осуществляют очистку металлов от примесей. Так, полученную из руды неочищенную медь отливают в форме толстых листов, которые затем помещают в ванну в качестве анодов. При электролизе медь анода растворяется, примеси, содержащие ценные и редкие металлы, выпадают на дно, а на катоде оседает чистая медь.

При помощи электролиза получают алюминий из расплава бокситов. Именно этот способ получения алюминия сделал его дешевым и наряду с железом самым распространенным в технике и быту металлом.

69. ЗАКОН ЭЛЕКТРОЛИЗА

При электролизе на электродах происходит выделение вещества. От чего зависит масса вещества, выделяющегося за определенное время Δt? Очевидно, что эта масса равна произведению массы одного иона m_{0i} на число ионов N_i, достигших электрода за время Δt:

$$m = m_{0i} N_i. \tag{10.1}$$

Масса иона m_{0i} согласно формуле (1.5) равна:

$$m_{0i} = \frac{M}{N_A}, \tag{10.2}$$

где M — молярная (или атомная) масса вещества, а N_A — постоянная Авогадро, т. е. число ионов в одном моле.

Число ионов, достигших электрода, равно:

$$N_i = \frac{\Delta q}{q_{0i}}. \qquad (10.3)$$

где $\Delta q = I\Delta t$ — заряд, протекший через электролит за время Δt, q_{0i} — заряд иона, который определяется валентностью атома n: $q_{0i} = ne$ (e — модуль элементарного заряда).

При диссоциации молекул, состоящих из одновалентных атомов ($n=1$), возникают однозарядные ионы. Например, при диссоциации молекул KBr возникают ионы K^+ и Br^-. Диссоциация молекулы медного купороса ведет к появлению двухзарядных ионов Cu^{2+} и SO_4^{2-}, так как атомы меди в данном соединении двухвалентны ($n=2$). Подставляя в формулу (10.1) выражения (10.2) и (10.3) и учитывая, что $\Delta q = I\Delta t$, а $q_{0i} = ne$, получим:

$$m = \frac{M}{neN_A} I\Delta t. \qquad (10.4)$$

Закон Фарадея. Обозначим через k коэффициент пропорциональности между массой вещества m и зарядом $\Delta q = I\Delta t$. Тогда

$$\boxed{m = kI\Delta t,} \qquad (10.5)$$

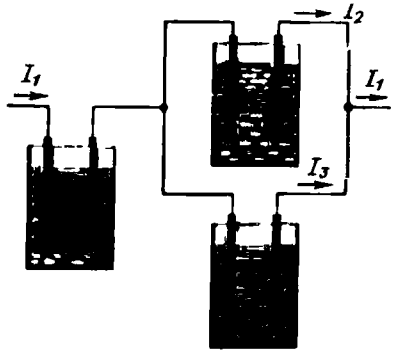
$$k = \frac{1}{eN_A}\frac{M}{n}; \qquad (10.6)$$

k — коэффициент пропорциональности, зависящий от природы вещества.

Следовательно, **масса вещества, выделившегося на электроде за время Δt при прохождении электрического тока, пропорциональна силе тока и времени.**

Это утверждение, полученное нами теоретически, впервые было установлено экспериментально Фарадеем и носит название закона электролиза Фарадея.

Рис. 166



Из формулы (10.5) видно, что коэффициент k численно равен массе выделившегося на электродах вещества при переносе ионами заряда, равного 1 Кл. Величину k называют электрохимическим эквивалентом данного вещества и выражают в килограммах на кулон (кг/Кл).

Электрохимический эквивалент имеет простой физический

смысл. Так как $\frac{M}{N_A}=m_{0i}$ и $en=q_{0i}$, то согласно (10.6) $k=\frac{m_{0i}}{q_{0i}}$, т. е. отношению массы иона к его заряду.

Измеряя величины m и Δq, можно определить электрохимические эквиваленты различных веществ.

Убедиться в справедливости закона Фарадея можно на опыте. Соберем установку, показанную на рисунке 166. Все три электролитические ванны заполнены одним и тем же раствором электролита, но токи, проходящие через них, различны. Обозначим силы токов через I_1, I_2, I_3. Тогда $I_1=I_2+I_3$. Измеряя массы m_1, m_2, m_3 выделившихся на электродах веществ в разных ваннах, можно убедиться, что они пропорциональны соответствующим силам тока I_1, I_2, I_3.

Постоянная Фарадея. Произведение элементарного заряда (заряда электрона) на постоянную Авогадро N_A носит название постоянной Фарадея: $F=eN_A$. Введя постоянную Фарадея в уравнение (10.4) для массы вещества, выделившегося при электролизе, получим:

$$m=\frac{1}{F}\frac{M}{n}I\Delta t. \qquad (10.7)$$

Согласно формуле (10.7) F численно равна заряду, который надо пропустить через раствор электролита, чтобы выделить на электроде массу вещества, численно равную отношению молярной массы вещества к валентности. Постоянная Фарадея, найденная из опыта, равна: $F\approx 96500$ Кл/моль.

Определение заряда электрона. Зная постоянную Авогадро и постоянную Фарадея, можно найти модуль заряда электрона:

$$e=\frac{F}{N_A}=\frac{96500}{6{,}02\cdot 10^{23}}\text{ Кл}\approx 1{,}6\cdot 10^{-19}\text{ Кл}.$$

Именно таким путем и было впервые в 1874 г. получено значение элементарного электрического заряда.

? **1. Что называют электролитической диссоциацией? 2. Почему при прохождении тока по раствору электролита происходит перенос вещества, а при прохождении по металлическому проводнику не происходит? 3. Сформулируйте закон Фарадея для электролиза. 4. Как можно определить элементарный электрический заряд по известному из опыта значению постоянной Фарадея?**

70. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ГАЗАХ

Электрический разряд в газе. Возьмем электрометр с присоединенными к нему дисками плоского конденсатора и зарядим его (рис. 167). При комнатной температуре, если воздух достаточно сухой, конденсатор заметно не разряжается. Это показывает,

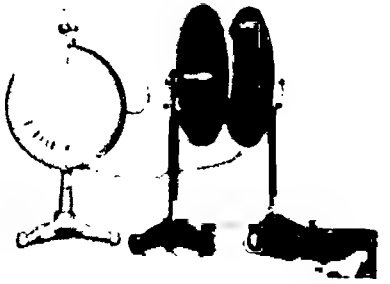


Рис. 167

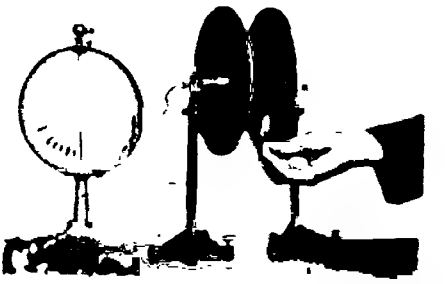


Рис. 168

что электрический ток в воздухе, вызываемый разностью потенциалов между дисками, очень мал. Следовательно, электрическая проводимость воздуха при комнатной температуре очень мала. Воздух можно считать диэлектриком.

Нагреем воздух между дисками горящей спичкой (рис. 168). Заметим, что стрелка электрометра быстро приближается к нулю, — значит, конденсатор разряжается. Следовательно, нагретый газ является проводником и в нем устанавливается ток.

Процесс протекания тока через газ называют газовым разрядом.

Ионизация газов. Мы видели, что при комнатной температуре воздух очень плохой проводник. При нагревании проводимость воздуха возрастает. Увеличение проводимости воздуха можно вызвать и иными способами, например действием различных излучений: ультрафиолетового, рентгеновского, радиоактивного и др.

При обычных условиях газы почти полностью состоят из нейтральных атомов или молекул и, следовательно, являются диэлектриками. Вследствие нагревания или воздействия излучения часть атомов ионизируется — распадается на положительно заряженные ионы и электроны (рис. 169). В газе могут образовываться и отрицательные ионы: они появляются благодаря присоединению электронов к нейтральным атомам.

Ионизация газов при нагревании объясняется тем, что по мере нагревания молекулы движутся быстрее. При этом некоторые молекулы начинают двигаться так быстро, что часть из них при столкновениях распадается, превращаясь в ионы. Чем выше температура, тем больше образуется ионов.

Проводимость газов. Механизм проводимости газов похож на механизм проводимости растворов и расплавов электролитов. Разница состоит в том, что отрицательный заряд переносится в основном не отрицательными ионами, как в водных растворах или расплавах электролитов, а электронами, хотя проводимость за счет отрицательных ионов также может играть определенную роль. Таким образом, в газах сочетается электронная прово-

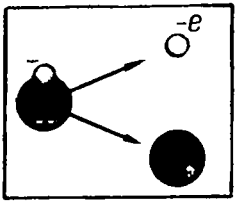


Рис. 169

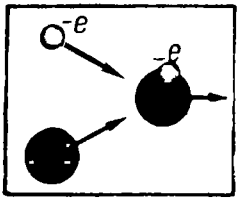


Рис. 170

димость, подобная проводимости металлов, с ионной проводимостью, подобной проводимости водных растворов или расплавов электролитов. Существенно еще одно различие. В растворах электролитов образование ионов происходит вследствие ослабления внутримолекулярных связей ионов в молекулах под действием молекул растворителя (молекул воды). В газах образование ионов происходит либо при нагревании, либо за счет действия внешних ионизаторов, например излучений.

Рекомбинация. Если ионизатор перестанет действовать, то можно заметить, что заряженный электрометр снова будет сохранять заряд. Это показывает, что после прекращения действия ионизатора газ перестает быть проводником. Ток прекращается после того, как все ионы и электроны достигнут электродов.

Кроме того, при сближении электрона и положительно заряженного иона они могут вновь образовать нейтральный атом. Схематически это изображено на рисунке 170. Такой процесс называют рекомбинацией заряженных частиц.

В отсутствие внешнего поля заряженные частицы исчезают только вследствие рекомбинации и газ становится диэлектриком. Если действие ионизатора неизменно, то устанавливается динамическое равновесие, при котором число вновь образующихся пар заряженных частиц равно среднему числу пар, исчезающих вследствие рекомбинации.

71. НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНЫЙ И САМОСТОЯТЕЛЬНЫЙ РАЗРЯДЫ

Несамостоятельный разряд. Для исследования разряда в газе при различных давлениях удобно использовать стеклянную трубку с двумя металлическими электродами (рис. 171).

Пусть с помощью какого-либо ионизатора в газе образуется в секунду определенное число пар заряженных частиц: положительных ионов и электронов.

При небольшой разности потенциалов между электродами трубки положительно заряженные ионы перемещаются к отрицательному электроду, а отрицательно заряженные — к положительному электроду. В результате в трубке возникает электрический ток, т. е. происходит газовый разряд.

Не все образующиеся ионы достигают электродов: часть их воссоединяется, образуя нейтральные молекулы газа. По мере увеличения разности потенциалов между электродами трубки

доля заряженных частиц, достигающих электродов, увеличивается. Возрастает и сила тока в цепи. Наконец, наступает момент, при котором все заряженные частицы, образующиеся в газе за секунду, достигают за это время электродов. При этом дальнейшего роста тока не происходит (рис. 172). Ток, как говорят, достигает насыщения. Если действие ионизатора прекращается, то прекращается и разряд, так как других источников ионов нет. По этой причине разряд называют несамостоятельным разрядом.

Самостоятельный разряд. Что будет происходить с разрядом в газе, если продолжать увеличивать разность потенциалов на электродах?

Казалось бы, что сила тока и при дальнейшем увеличении разности потенциалов должна оставаться неизменной. Однако опыт показывает, что при увеличении разности потенциалов между электродами начиная с некоторого значения ток снова возрастает (рис. 173). Это означает, что в газе появляются дополнительные ионы сверх тех, которые образуются за счет действия ионизатора. Сила тока может возрасти в сотни и тысячи раз, а число ионов, возникающих в процессе разряда, может стать таким большим, что внешний ионизатор будет уже не нужен для поддержания разряда. Если теперь убрать внешний ионизатор, то разряд не прекратится. Поскольку разряд не нуждается для своего поддержания во внешнем ионизаторе, его называют самостоятельным разрядом.

Ионизация электронным ударом. Каковы же причины резкого увеличения силы тока при больших напряжениях?

Рассмотрим какую-либо пару заряженных частиц (положительный ион и электрон), образовавшуюся благодаря действию внешнего ионизатора. Появившийся таким образом свободный электрон начинает двигаться к положительному электроду — аноду, а положительный ион — к катоду. На своем пути электрон встречает ионы и нейтральные атомы. В промежутках между двумя последовательными столкновениями энергия электрона увеличивается за счет работы сил электрического поля. Чем больше разность потенциалов между электродами, тем больше напряженность электрического поля. Кинетическая энергия элект-

Рис. 171

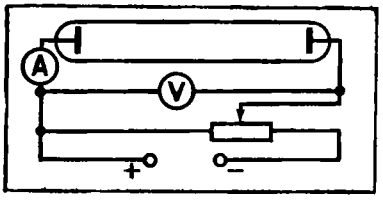


Рис. 172

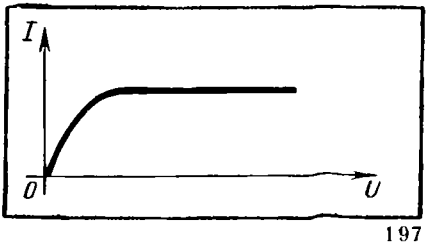


Рис. 173

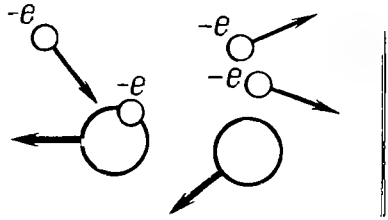


Рис. 174

рона перед очередным столкновением пропорциональна напряженности поля и длине свободного пробега электрона (пути между двумя последовательными столкновениями):

$$\frac{mv^2}{2} = eEl. \tag{10.8}$$

Если кинетическая энергия электрона превосходит работу A_i, которую нужно совершить, чтобы ионизировать нейтральный атом, т. е.

$$\frac{mv^2}{2} \geqslant A_i,$$

то при столкновении электрона с атомом происходит ионизация. Схема этого процесса изображена на рисунке 174. В результате вместо одного электрона возникают два (налетающий на атом и вырванный из атома). Они, в свою очередь, получают энергию в поле и ионизируют встречные атомы и т. д. Вследствие этого число заряженных частиц быстро нарастает, возникает электронная лавина. Описанный процесс называют ионизацией электронным ударом. Но одна ионизация электронным ударом не может обеспечить поддержания самостоятельного разряда. Действительно, ведь все возникающие таким образом электроны движутся по направлению к аноду и по достижении анода «выбывают из игры». Для поддержания разряда необходима эмиссия электронов с катода («эмиссия» означает «испускание»). Эмиссия электронов может быть обусловлена несколькими причинами.

Положительные ионы, образовавшиеся при столкновении электронов с нейтральными атомами, при своем движении к катоду приобретают под действием поля большую кинетическую энергию. При ударах таких быстрых ионов о катод с поверхности катода выбиваются электроны.

Термоэлектронная эмиссия. Кроме того, катод может испускать электроны при нагревании до большой температуры. Этот процесс называется термоэлектронной эмиссией. Его можно рассматривать как испарение электронов из металла. Во

многих твердых веществах термоэлектронная эмиссия происходит при температурах, при которых испарение самого вещества еще мало. Такие вещества и используют для изготовления катодов.

При самостоятельном разряде нагрев катода может происходить за счет бомбардировки его положительными ионами. Если энергия ионов не слишком велика, то выбивания электронов с катода не происходит и электроны испускаются вследствие термоэлектронной эмиссии.

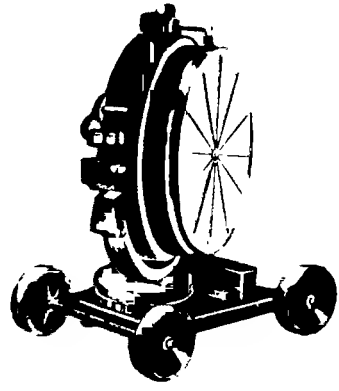
72. РАЗЛИЧНЫЕ ТИПЫ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РАЗРЯДА И ИХ ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ

В зависимости от свойств и состояния газа, характера и расположения электродов, а также от приложенного к электродам напряжения возникают различные виды самостоятельного разряда в газах.

Тлеющий разряд. При низких давлениях (десятые и сотые доли миллиметра ртутного столба) в трубке наблюдается тлеющий разряд. Для возбуждения тлеющего разряда достаточно напряжения между электродами в несколько сотен (а иногда и значительно меньше) вольт. При тлеющем разряде почти вся трубка, за исключением небольшого участка возле катода, заполнена однородным свечением, называемым положительным столбом (см. цветную вклейку 4).

Электрическая дуга. При соприкосновении двух угольных стержней в месте их контакта электрический ток выделяет большое количество теплоты из-за большого сопротивления контакта. Температура повышается настолько, что начинается термоэлектронная эмиссия. Вследствие этого при раздвижении угольных электродов между ними начинается разряд. Между углями возникает столб яркого светящегося газа — электрическая дуга. Проводимость газа в этом случае значительна и при атмосферном давлении, так как число электронов, испускаемых отрицательным электродом, очень велико. Сила тока в небольшой дуге достигает нескольких ампер, а в больших дугах — нескольких сотен ампер при разности потенциалов порядка 50 В.

Рис. 175



Электрическая дуга была впервые получена в 1802 г. русским академиком В. В. Петровым.

Дуговой разряд — мощный источник света, его используют в

прожекторах (рис. 175), проекционных аппаратах и киноаппаратах.

В металлургии широко применяют электропечи, в которых источником теплоты служит дуговой разряд (см. цветную вклейку 3). Дуговой разряд используют также для сварки металлов (рис. 176).

Рис 176

Другие типы самостоятельного разряда. При атмосферном давлении вблизи заостренных участков проводника, несущего большой электрический заряд, наблюдается разряд, светящаяся область которого напоминает корону (см. цветную вклейку 4). Этот разряд, называемый коронным, вызывается высокой (около 3×10^6 В/м) напряженностью электрического поля вблизи заряженного острия. С коронным разрядом приходится считаться, имея дело с высоким напряжением. При наличии выступающих частей или очень тонких проводов может начаться коронный разряд. Это приводит к утечке электроэнергии. Чем выше напряжение высоковольтной линии, тем толще должны быть провода.

При большом напряжении между электродами в воздухе возникает искровой разряд, имеющий вид пучка ярких зигзагообразных полосок, разветвляющихся от тонкого канала (рис. 177). Этот вид разряда возникает тогда, когда мощность источника недостаточна для поддержания дугового или тлеющего разряда. Пример гигантского искрового разряда — молния (см. цветную вклейку 4).

73. ПЛАЗМА

При очень низких температурах все вещества находятся в твердом состоянии. Нагревание вызывает переход вещества из твердого состояния в жидкое, а затем и в газообразное.

При достаточно больших температурах начинается ионизация газа за счет столкновений быстро движущихся атомов или молекул. Вещество переходит в новое состояние, называемое плазмой[1]. *Плазма — это частично или полностью ионизированный газ, в котором плотности положительных и отрицательных зарядов практически совпадают.* Таким образом, плазма в целом является электрически нейтральной системой. В зависимости от условий степень ионизации плазмы, т. е. отношение числа ионизированных атомов к их полному числу, может быть различной. В полностью ионизированной плазме нейтральных атомов нет.

Наряду с нагреванием ионизация газа и образование плазмы могут быть вызваны разного рода излучениями или бомбардировкой атомов газа быстрыми заряженными частицами. При этом получается так называемая низкотемпературная плазма.

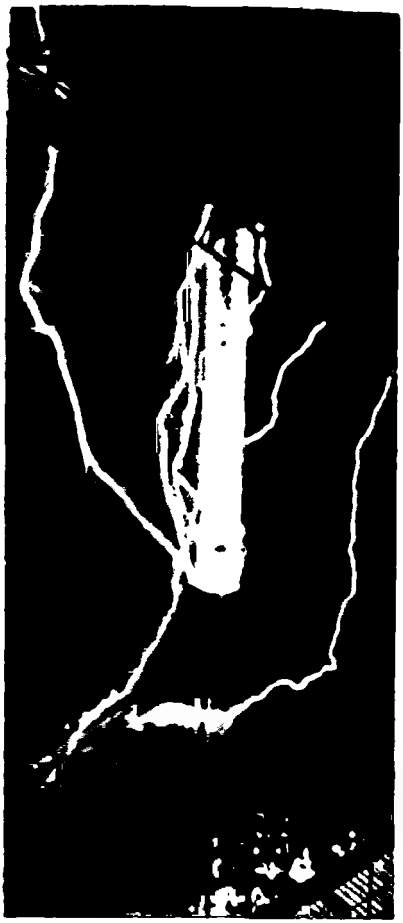


Рис. 177

Свойства плазмы. Плазма обладает рядом специфических свойств, что позволяет рассматривать ее как особое четвертое состояние вещества.

Из-за большой подвижности заряженные частицы плазмы легко перемещаются под действием электрических и магнитных полей. Поэтому любое нарушение электрической нейтральности отдельных областей плазмы, вызванное скоплением частиц одного знака заряда, быстро ликвидируется. Возникающие электрические поля перемещают заряженные частицы до тех пор, пока электрическая нейтральность не восстанавливается и электрическое поле не становится равным нулю.

В отличие от нейтрального газа, между молекулами которого существуют короткодействующие силы, между заряженными

[1] От греческого слова plasma — оформленное. Первоначально это слово начали употреблять в биологии для обозначения бесцветных жидких компонентов крови и живых тканей. В физике слово «плазма» приобрело другой смысл.

частицами плазмы действуют кулоновские силы, сравнительно медленно убывающие с расстоянием. Каждая частица взаимодействует сразу с большим количеством окружающих частиц. Благодаря этому, наряду с хаотическим тепловым движением, частицы плазмы могут участвовать в разнообразных упорядоченных (коллективных) движениях. В плазме легко возбуждаются разного рода колебания и волны.

Проводимость плазмы увеличивается по мере роста степени ионизации. При высокой температуре полностью ионизированная плазма по своей проводимости приближается к сверхпроводникам.

Плазма в космосе и вокруг Земли. В состоянии плазмы находится подавляющая (около 99%) часть вещества Вселенной. Вследствие высокой температуры Солнце и другие звезды состоят в основном из полностью ионизированной плазмы.

Из плазмы состоит и межзвездная среда, заполняющая пространство между звездами и галактиками. Плотность межзвездной среды очень мала, в среднем менее одного атома на 1 $см^3$. Ионизация атомов межзвездной среды производится излучением звезд и космическими лучами — потоками быстрых частиц, пронизывающими пространство Вселенной по всем направлениям. В отличие от горячей плазмы звезд температура межзвездной плазмы очень мала.

Плазмой окружена наша планета. Верхний слой атмосферы на высоте 100 - 300 км представляет собой ионизированный газ — ионосферу. Ионизация воздуха верхних слоев атмосферы вызывается преимущественно излучением Солнца и потоком заряженных частиц, испускаемых Солнцем. Выше ионосферы простираются радиационные пояса Земли, открытые с помощью спутников. Радиационные пояса также состоят из плазмы.

Многими свойствами плазмы обладают свободные электроны в металлах. В отличие от обычной плазмы, в плазме твердых тел положительные ионы не могут перемещаться по всему телу.

Практические применения плазмы. Плазма возникает при всех видах разряда в газах: тлеющем, дуговом, искровом и т. д. Такую плазму называют газоразрядной.

В светящихся трубках для рекламных надписей и в лампах дневного света используют плазму положительного столба тлеющего разряда. В лампах дневного света происходит разряд в парах ртути. Стеклянную трубку покрывают специальным составом — люминофором[1], который под действием излучения плазмы сам начинает светиться. Люминофор подбирают таким, чтобы его свечение было близко по составу к белому свету.

Газоразрядную плазму используют во многих приборах, например в газовых лазерах — квантовых источниках света. Лазеры — наиболее мощные источники света. Их излучение обла-

[1] От латинского слова «люмен» — свет и греческого «форос» — несущий.

дает рядом замечательных свойств. С ними вы познакомитесь в X классе.

Струя плазмы применяется в магнитогидродинамических генераторах (МГД), упомянутых на странице 173. Для космических кораблей перспективно применение маломощных плазменных двигателей.

Сравнительно недавно был создан новый прибор — плазмотрон. В плазмотроне создаются мощные струи плотной плазмы, широко применяемые в различных областях техники: для резки и сварки металлов, бурения скважин в твердых породах и т. д. (см. цветную вклейку 4). В плазменной струе ускоряются многие химические реакции и могут происходить такие реакции, которые в обычных условиях не происходят.

Наиболее значительные перспективы физики видят в применении высокотемпературной плазмы (с температурой в десятки миллионов градусов) для создания управляемых термоядерных реакций. В настоящее время ведутся интенсивные исследования по осуществлению этих реакций, сопровождающихся выделением огромной энергии. Решение этой грандиозной задачи даст в руки человечества практически неисчерпаемый источник энергии.

1. В чем разница между диссоциацией электролитов и ионизацией газов? 2. При каких условиях несамостоятельный разряд в газах превращается в самостоятельный? 3. Что такое термоэлектронная эмиссия? 4. Перечислите основные типы самостоятельного разряда. 5. Что называют плазмой?

74. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ВАКУУМЕ

В электроннолучевых трубках, электронных лампах радиоприемников и во множестве других устройств электроны движутся в вакууме. Как же получают потоки электронов в вакууме? Какими свойствами они обладают?

Самостоятельный газовый разряд в стеклянной трубке с двумя электродами (рис. 171) может происходить лишь при условии, что давление газа не слишком мало. При уменьшении давления до значений, меньших 0,0001 мм рт. ст., разряд прекращается, т. е. сила тока становится равной нулю, хотя напряжение на электродах трубки отлично от нуля.

Это происходит вследствие того, что атомов становится слишком мало, чтобы поддерживать ток за счет ионизации электронным ударом и выбивания ионами электронов с катода.

Разреженный газ не проводит ток и при дальнейшем уменьшении давления. Продолжая откачивать газ, можно дойти до такой его концентрации, при которой молекулы успевают пролетать от одной стенки до другой, ни разу не испытав соударений

друг с другом. Такое состояние газа в трубке называют вакуумом.

Разреженный газ превращается в проводник благодаря действию ионизатора (несамостоятельный газовый разряд, § 71). Если же газа так мало, что можно говорить о состоянии вакуума, то проводимость межэлектродного промежутка можно обеспечить только с помощью введенного в трубку источника заряженных частиц.

Чаще всего действие такого источника основано на свойстве тел, нагретых до высокой температуры, испускать электроны. Явление термоэлектронной эмиссии, о котором уже упоминалось в § 71, имеет широчайшую область практического применения. В большинстве современных электронных вакуумных приборов источником заряженных частиц является нагретый катод.

75. ДВУХЭЛЕКТРОДНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ ЛАМПА-ДИОД

Явление термоэлектронной эмиссии приводит к тому, что нагретый металлический электрод, в отличие от холодного, непрерывно испускает электроны, которые образуют вокруг него «электронное облако». Электрод при этом заряжается положительно, и под влиянием электрического поля электроны из облака частично возвращаются на электрод. В равновесном состоянии число электронов, покинувших электрод в секунду, равно числу электронов, возвратившихся на электрод за это время. Чем выше температура металла, тем выше плотность электронного облака.

Различие между горячим и холодным электродами, впаянными в откачанный сосуд, приводит к односторонней проводимости электрического тока между ними. При подключении электродов к источнику тока между ними возникает электрическое поле. Если положительный полюс источника соединен с холодным электродом (анодом), а отрицательный — с нагретым (катодом), то напряженность электрического поля направлена к нагретому электроду. Под действием этого поля электроны частично покидают электронное облако и движутся к холодному электроду. Электрическая цепь замыкается, и в ней устанавливается электрический ток. При противоположном включении источника напряженность поля направлена от катода к аноду. Электрическое поле отталкивает электроны облака назад к катоду. Цепь оказывается разомкнутой, и ток в цепи отсутствует.

Диод. Односторонняя проводимость используется в электронных приборах с двумя электродами — вакуумных диодах.

Устройство современного вакуумного диода таково. Внутри баллона из стекла или металлокерамики, из которого откачан

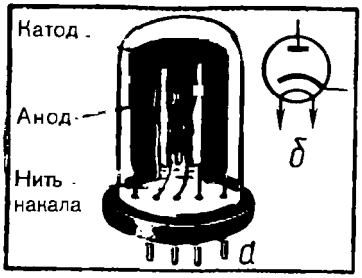


Рис. 178

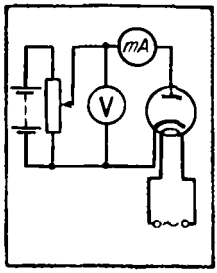


Рис. 179

воздух до давления 10^{-6}—10^{-7} мм рт. ст., размещены два электрода (рис. 178, *а*). Один из них — катод — имеет вид вертикального металлического цилиндра, покрываемого обычно слоем оксидов щелочноземельных металлов — бария, стронция, кальция. Такой катод называют оксидным. При нагревании поверхность оксидного катода выделяет гораздо больше электронов, чем поверхность катода из чистого металла. Внутри катода расположен изолированный проводник, нагреваемый переменным током. Нагретый катод испускает электроны, достигающие анода, если он имеет более высокий потенциал, чем катод.

Анод лампы представляет собой круглый или овальный цилиндр, имеющий общую ось с катодом. Схематическое изображение диода показано на рисунке 178, *б*.

Вольт-амперная характеристика диода. Существенные свойства любого электронного устройства отражает его вольт-амперная характеристика, т. е. зависимость силы тока от разности потенциалов на клеммах этого устройства. Получить вольт-амперную характеристику диода можно с помощью цепи, схема которой изображена на рисунке 179. В отличие от характеристики металлического проводника эта характеристика не линейная (рис. 180). Основная причина нелинейности характеристики вакуумного диода в том, что свободные электроны, образующие ток в пространстве диода, испускаются одним из электродов в ограниченном количестве. Кроме того, на движение электронов, наряду с полем, созданным зарядами на электродах, существенное влияние оказывает поле пространственного заряда электронного облака у катода.

Чем выше напряжение между анодом и катодом, тем меньше пространственный заряд электронного облака, тем большее количество электронов достигает анода, следовательно, тем больше и сила тока в лампе. Если катод не покрыт оксидным слоем, то при достаточно большом напряжении все электроны, покинувшие катод, достигают анода и при дальнейшем увеличении напряжения ток не меняется, наступает насыщение (пунктирная линия на рисунке 181). Если повысить температуру катода

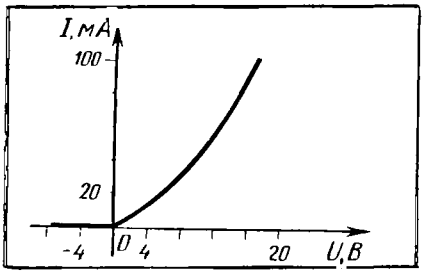


Рис. 180

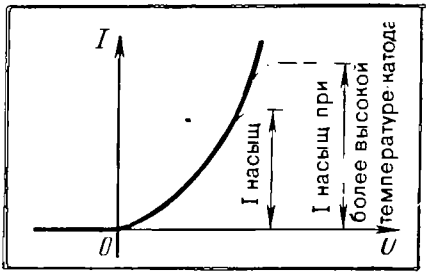


Рис. 181

(это можно сделать, изменив сопротивление реостата в цепи накала), то катод будет покидать большее число электронов. Электронное облако вокруг катода станет более плотным. Ток насыщения наступит при большем напряжении между анодом и катодом, и сила тока насыщения возрастет (вторая пунктирная линия на рисунке 181). В электронной лампе с оксидным катодом достигнуть насыщения нельзя, ибо это требует столь больших разностей потенциалов, при которых катод разрушается.

Диоды применяются для выпрямления переменного электрического тока.

76. ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУЧКИ. ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВАЯ ТРУБКА

Если в аноде электронной лампы сделать отверстие, то часть электронов, ускоренных электрическим полем, пролетит в отверстие, образуя за анодом электронный пучок. Количеством электронов в пучке можно управлять, поместив между катодом и анодом дополнительный электрод и изменяя его потенциал. При взаимодействии с веществом быстрые частицы электронного пучка вызывают разнообразные явления, используемые на практике.

Свойства электронных пучков и их применения. Электронный пучок, попадая на тела, вызывает их нагревание. В современной технике это свойство используют для электронной плавки сверхчистых металлов в вакууме.

Рис. 182

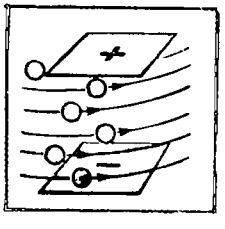


Рис. 183

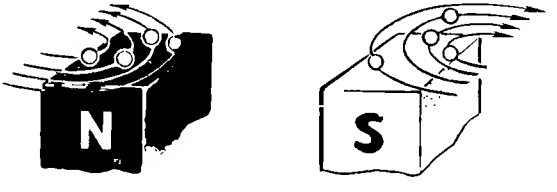


Рис. 184

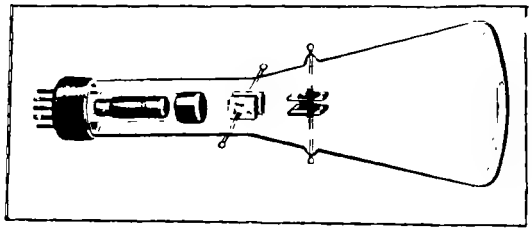


Рис. 185

При торможении быстрых электронов, попадающих на вещество, возникает рентгеновское излучение. Это свойство используют в рентгеновских трубках, о чем вы узнаете в X классе.

Некоторые вещества (стекло, сульфиды цинка и кадмия), бомбардируемые электронами, светятся. В настоящее время среди материалов этого типа (люминофоров) применяются такие, у которых в световую энергию превращается до 25% энергии электронного пучка.

Электронные пучки отклоняются электрическим полем. Например, проходя между пластинами конденсатора, электроны отклоняются от отрицательно заряженной пластины к положительно заряженной (рис. 182).

Электронный пучок отклоняется также в магнитном поле. Пролетая над северным полюсом магнита, электроны отклоняются влево, а пролетая над южным,— отклоняются вправо (рис. 183). Отклонение электронных потоков, идущих от Солнца, в магнитном поле Земли приводит к тому, что свечение газов верхних слоев атмосферы (полярные сияния) наблюдается только у полюсов.

Возможность управления электронным пучком с помощью электрического или магнитного поля и свечение покрытого люминофором экрана под действием пучка применяют в электронолучевой трубке.

Электроннолучевая трубка. Электроннолучевая трубка — основной элемент телевизора и осциллографа[1] — прибора для исследования быстропеременных процессов в электрических цепях (рис. 184).

Устройство электроннолучевой трубки показано на рисунке 185. Трубка представляет собой вакуумный баллон, одна из стенок которого служит экраном. В узком конце трубки помещен источник быстрых электронов — электронная пушка (рис. 186). Она состоит из катода, управляющего электрода и анода (чаще несколько анодов располагаются друг за другом). Электроны испускаются нагретым оксидным слоем с торца цилиндриче-

[1] От латинского слова «осцилло» — качаюсь и греческого «графо» — пишу.

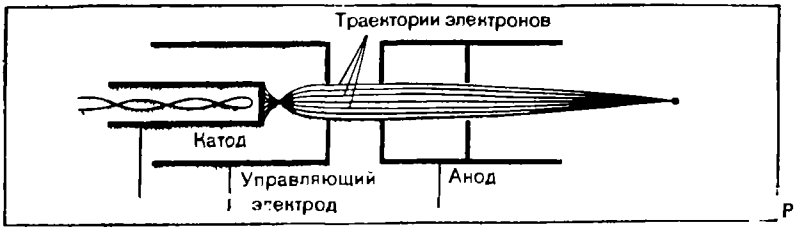


Рис. 186

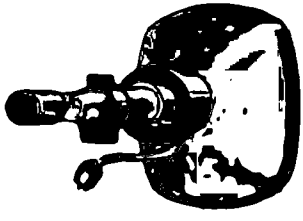
ского катода и проходят через отверстие в цилиндрическом управляющем электроде (он регулирует число электронов в пучке). Каждый анод состоит из дисков с небольшими отверстиями, вставленных в металлический цилиндр. Между первым анодом и катодом создается разность потенциалов в сотни и даже тысячи вольт. Сильное электрическое поле ускоряет электроны, и они приобретают большую скорость. Форма, расположение и потенциалы анодов выбраны так, чтобы наряду с ускорением электронов происходила и фокусировка электронного пучка, т. е. уменьшение площади поперечного сечения пучка на экране почти до точки.

На пути к экрану пучок последовательно проходит между двумя парами управляющих пластин, подобных пластинам плоского конденсатора. Если электрического поля между пластинами нет, то пучок не отклоняется и светящаяся точка располагается в центре экрана. При сообщении разности потенциалов вертикально расположенным пластинам пучок смещается в горизонтальном направлении, а при сообщении разности потенциалов горизонтальным пластинам он смещается в вертикальном направлении.

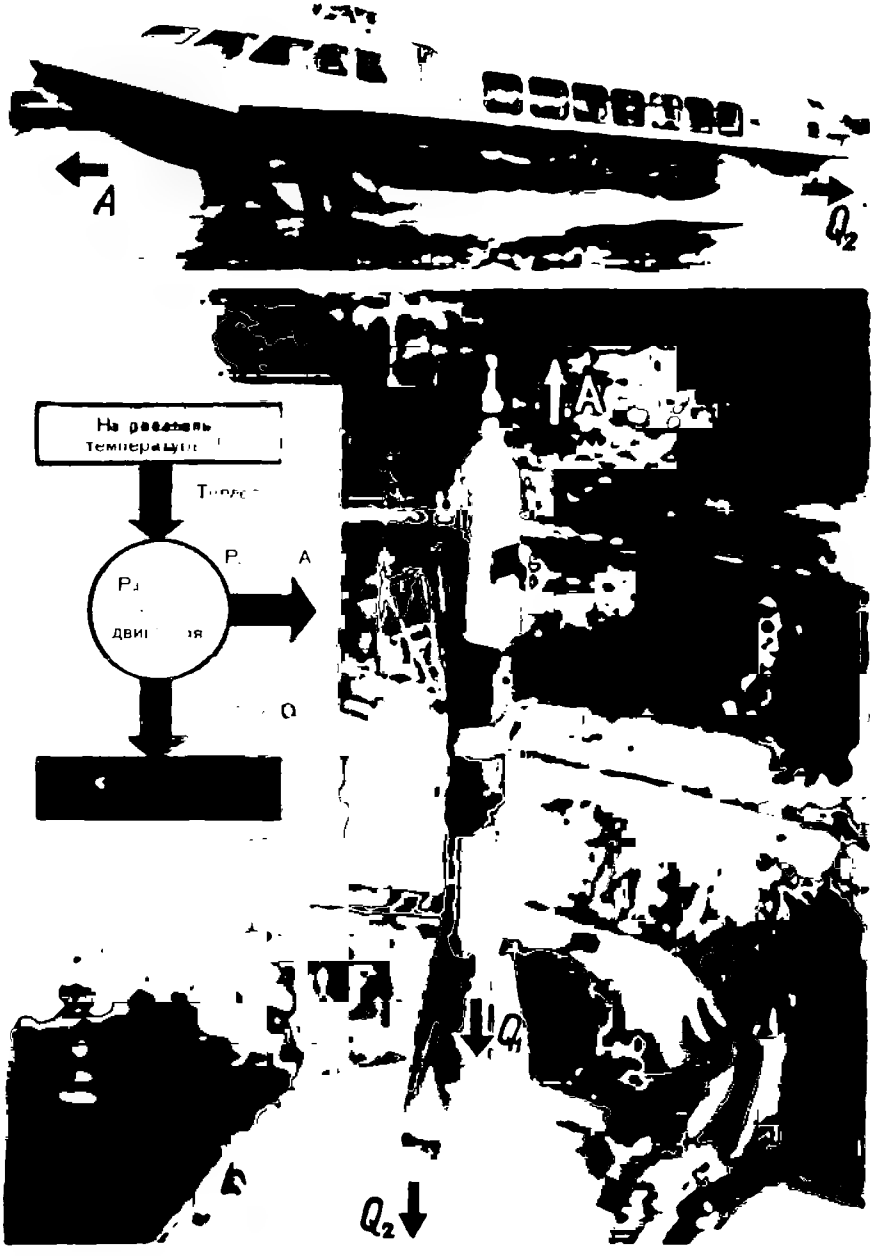
Одновременное использование двух пар пластин позволяет перемещать светящуюся точку по экрану в любом направлении. Так как масса электронов очень мала, то они почти мгновенно реагируют на изменение разности потенциалов управляющих пластин.

В электроннолучевой трубке, применяемой в телевизоре (так называемом кинескопе), управление пучком, созданным электронной пушкой, осуществляется с помощью магнитного поля. Это поле создают катушки, надетые на горловину трубки (рис. 187).

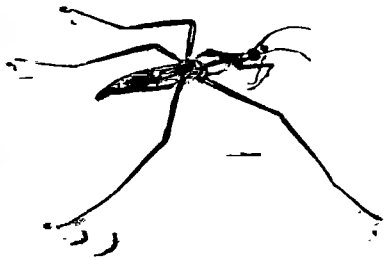
Рис. 187



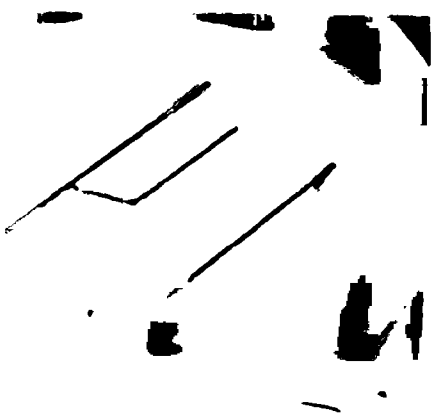
? **1. Для какой цели в электроннолучевой трубке и электронных лампах создают вакуум? 2. Как устроен диод? 3. Начертите вольт-амперную характеристику диода и объясните ее особенности. 4. Как осуществляется управление электронными пучками? 5. Как устроена электроннолучевая трубка?**



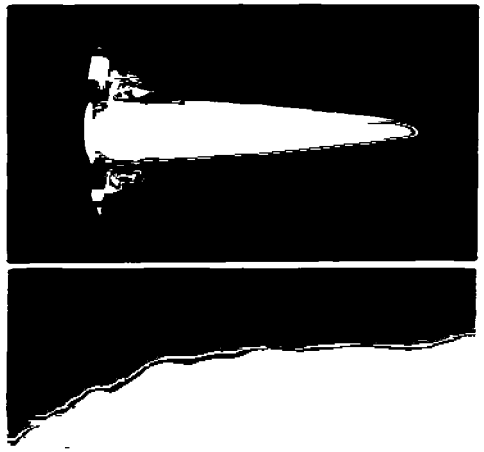
1. Примеры тепловых машин: двигатель внутреннего сгорания, ракетный двигатель. При работе тепловая машина получает количество теплоты Q_1, отдает Q_2. Совершаемая работа $A = Q_1 - Q_2$.

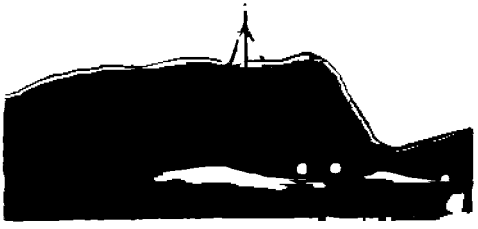


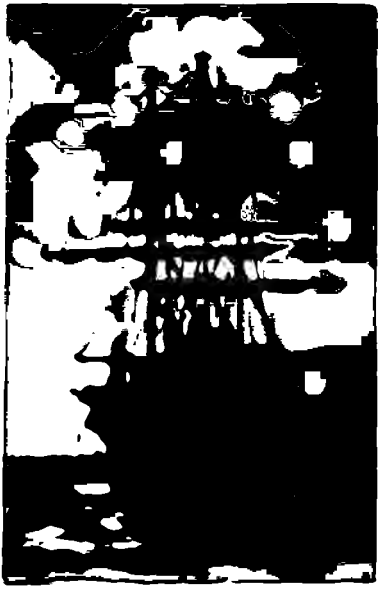
2. Силы поверхностного натяжения удерживают стальную иглу и насекомое водомерку на поверхности воды. Эти силы определяют форму и свойства мыльного пузыря и капель жидкости.



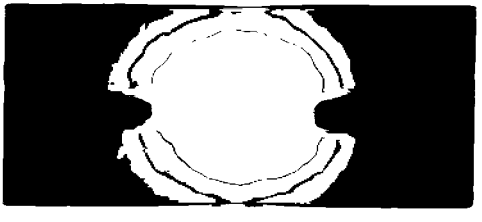
3. Дуговая электрическая печь для выплавки стали:
1 — кожух; *2* — футеровка; *3* — электрод.







4. Примеры газовых разрядов: струя плазмы, бьющая из сопла плазмотрона; свечение верхних слоев атмосферы, бомбардируемых заряженными космическими частицами (полярное сияние); тлеющий разряд в трубке; электрическая дуга; гигантский искровой разряд (молния); коронный разряд (огни святого Эльма).



77. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Наиболее отчетливо полупроводники отличаются от проводников характером зависимости электропроводимости от температуры. Измерения показывают, что у ряда элементов (кремний, германий, селен и др.) и соединений (PbS, CdS и др.) удельное сопротивление с увеличением температуры не растет, как у металлов (см. рис. 149), а, наоборот, уменьшается (рис. 188). Такие вещества и называют полупроводниками.

Из графика, изображенного на этом рисунке, видно, что при температурах, близких к абсолютному нулю, удельное сопротивление полупроводников очень велико. Это означает, что при низких температурах полупроводник ведет себя как диэлектрик. По мере повышения температуры удельное сопротивление быстро уменьшается. В чем же причины этого?

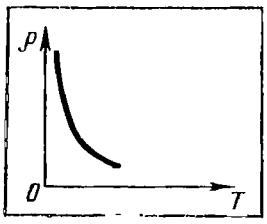
Строение полупроводников. Чтобы понять механизм возникновения проводимости в полупроводниках, необходимо знать строение полупроводниковых кристаллов и природу связей, удерживающих атомы кристалла возле друг друга. Для примера рассмотрим кристалл кремния.

Кремний — четырехвалентный элемент. Это означает, что во внешней оболочке атома имеется четыре электрона, сравнительно слабо связанных с ядром. Число ближайших соседей каждого атома кремния также равно четырем. Плоская схема структуры кристалла кремния изображена на рисунке 189.

Взаимодействие пары соседних атомов осуществляется с помощью парноэлектронной связи, называемой ковалентной связью (см. учебник «Неорганическая химия» для VII—VIII классов). В образовании этой связи от каждого атома участвует по одному валентному электрону, которые отщепляются от атомов (коллективизируются кристаллом) и при своем движении большую часть времени проводят в пространстве между соседними атомами. Их отрицательный заряд удерживает положительные ионы кремния друг возле друга.

Не надо думать, что коллективизированная пара электронов принадлежит лишь двум атомам. Каждый атом образует четыре связи с соседними, и данный валентный электрон может двигаться по любой из них. Дойдя до соседнего атома, он может перейти к следующему, а затем дальше вдоль всего кристалла. Коллективизированные валентные электроны принадлежат всему кристаллу.

Рис. 188



Парноэлектронные связи кремния достаточно прочны и при низких температурах не разрываются. Поэтому кремний при низкой температуре не проводит электрического тока. Участвующие в связи атомов валентные электроны прочно при-

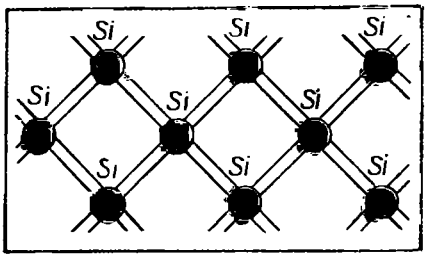


Рис. 189

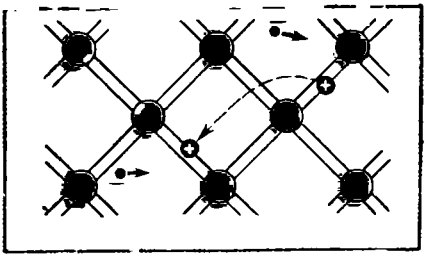


Рис. 190

вязаны к кристаллической решетке, и внешнее электрическое поле не оказывает заметного влияния на их движение. Аналогичное строение имеет кристалл германия.

Электронная проводимость. При нагревании кремния кинетическая энергия валентных электронов повышается и наступает разрыв отдельных связей. Некоторые электроны покидают свои «проторенные пути» и становятся свободными, подобно электронам в металле. В электрическом поле они перемещаются между узлами решетки, образуя электрический ток (рис. 190).

Проводимость полупроводников, обусловленную наличием у них свободных электронов, называют электронной проводимостью. По мере повышения температуры число разорванных связей и, значит, свободных электронов увеличивается. Это приводит к уменьшению сопротивления.

Дырочная проводимость. При разрыве связи образуется вакантное место с недостающим электроном. Его называют дыркой. В дырке имеется избыточный положительный заряд по сравнению с остальными, нормальными связями (рис. 190).

Положение дырки в кристалле не является неизменным. Непрерывно происходит следующий процесс. Один из электронов, обеспечивающих связь атомов, перескакивает на место образовавшейся дырки и восстанавливает здесь парноэлектронную связь, а там, откуда перескочил электрон, образуется новая дырка. Таким образом, дырка может перемещаться по всему кристаллу.

Если напряженность электрического поля в образце равна нулю, то перемещение дырок, равноценное перемещению положительных зарядов, происходит хаотически и поэтому не создает электрического тока. При наличии электрического поля возникает упорядоченное перемещение дырок и, таким образом, к электрическому току свободных электронов добавляется электрический ток, связанный с перемещением дырок. Направление движения дырок противоположно направлению движения электронов.

Таким образом, в полупроводниках имеются носители зарядов двух типов: электроны и дырки. Полупроводники поэтому обладают не только электронной, но и дырочной проводимостью.

78. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ПРИ НАЛИЧИИ ПРИМЕСЕЙ

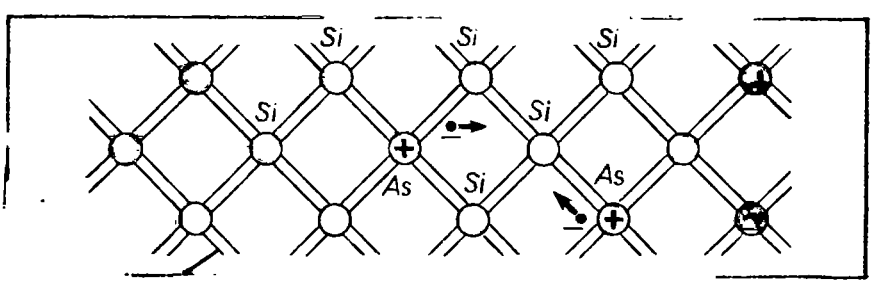
Мы рассмотрели механизм проводимости идеальных полупроводников. Проводимость при этих условиях называют собственной проводимостью полупроводников.

Собственная проводимость полупроводников обычно невелика, так как мало число свободных электронов, например, в германии при комнатной температуре $n_e = 3 \cdot 10^{13}$ см$^{-3}$. В то же время число атомов германия в 1 см^3 порядка 10^{23}. Таким образом, число свободных электронов составляет примерно одну десятимиллиардную часть от общего числа атомов. Собственная проводимость полупроводников во многом сходна с проводимостью водных растворов или расплавов электролитов. И в том и в другом случае число свободных носителей заряда увеличивается с ростом интенсивности теплового движения. Поэтому и у полупроводников, и у водных растворов или расплавов электролитов наблюдается увеличение проводимости с ростом температуры.

Существенная особенность полупроводников состоит в том, что в них при наличии примесей наряду с собственной проводимостью возникает дополнительная, примесная проводимость. Изменяя концентрацию примеси, можно значительно изменять число носителей заряда того или иного знака. Благодаря этому можно создавать полупроводники с преимущественной концентрацией либо отрицательно, либо положительно заряженных носителей. Эта особенность полупроводников открывает широкие возможности для их практического применения.

Донорные примеси. Оказывается, что при наличии примесей, например атомов мышьяка, даже при очень малой их концентрации, число свободных электронов возрастает во много раз. Происходит это по следующей причине. Атомы мышьяка имеют пять валентных электронов. Четыре из них участвуют в создании ковалентной связи данного атома с окружающими, например с атомами кремния. Пятый валентный электрон оказывается слабо связанным с атомом. Он легко покидает атом мышьяка и становится свободным (рис. 191).

Рис. 191



При добавлении одной десятимиллионной доли атомов мышьяка концентрация свободных электронов становится равной 10^{16} см$^{-3}$. Это в тысячу раз больше концентрации свободных электронов в чистом полупроводнике.

Примеси, легко отдающие электроны и, следовательно, увеличивающие число свободных электронов, называют донорными (отдающими) примесями.

Поскольку полупроводники, имеющие донорную примесь, обладают большим числом электронов (по сравнению с числом дырок), их называют полупроводниками *n*-типа (от слова negativ — отрицательный). В полупроводнике *n*-типа электроны являются основными носителями заряда, а дырки — неосновными.

Акцепторные примеси. Если в качестве примеси использовать индий, атомы которого трехвалентны, то характер проводимости полупроводника меняется. Теперь для образования нормальных парноэлектронных связей с соседями атому индия недостает электрона. В результате образуется дырка. Число дырок в кристалле равно числу атомов примеси.

Такого рода примеси называют акцепторными (принимающими).

При наличии электрического поля дырки перемещаются по полю и возникает дырочная проводимость. Полупроводники с преобладанием дырочной проводимости над электронной называют полупроводниками *p*-типа (от слова positiv — положительный). Основными носителями заряда в полупроводнике *p*-типа являются дырки, а неосновными — электроны.

79. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК ЧЕРЕЗ КОНТАКТ ПОЛУПРОВОДНИКОВ *p*- И *n*- ТИПОВ

На рисунке 192 изображена схема полупроводника, правая часть которого содержит донорные примеси и поэтому является полупроводником *n*-типа, а левая — акцепторные примеси и представляет собой полупроводник *p*-типа. Электроны изображены цветными кружками, а дырки — черными. Контакт двух полупроводников называют *p* — *n*-переходом.

Рис. 192

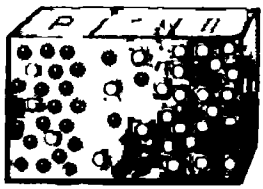
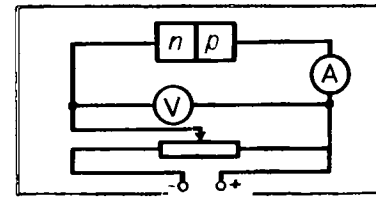


Рис. 193



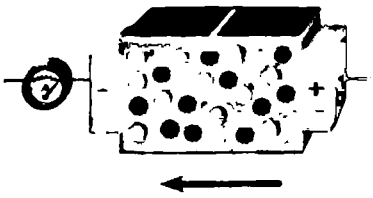


Рис. 194

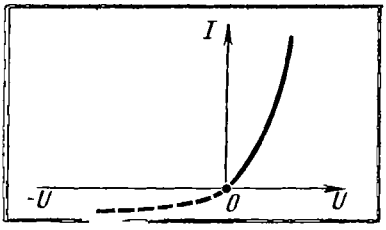


Рис. 195

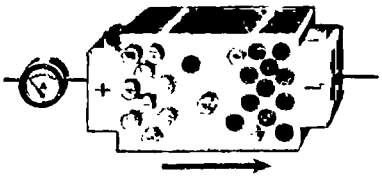
Включим полупроводник с p n-переходом в электрическую цепь (рис. 193). Подключим сначала батарею так, чтобы потенциал полупроводника p-типа был положительным, а n-типа — отрицательным. При этом ток через p–n-переход будет осуществляться основными носителями: из области n в область p — электронами, а из области p в область n — дырками (рис. 194). Вследствие этого проводимость всего образца будет большой, а сопротивление — малым.

Рассмотренный здесь переход называют прямым. Зависимость силы тока от разности потенциалов — вольт-амперная характеристика прямого перехода – изображена на рисунке 195 сплошной линией.

Переключим полюса батареи. Тогда при той же разности потенциалов сила тока в цепи окажется значительно меньшей, чем при прямом переходе. Это обусловлено следующим. Электроны через контакт идут теперь из области p в область n, а дырки из области n в область p. Но ведь в полупроводнике p-типа мало свободных электронов, а в полупроводнике n-типа мало дырок. Теперь переход через контакт осуществляется неосновными носителями, число которых мало (рис. 196). Вследствие этого проводимость образца оказывается незначительной, а сопротивление — большим. Образуется так называемый запирающий слой. Этот переход называют обратным. Вольт-амперная характеристика обратного перехода изображена на рисунке 195 пунктирной линией.

Таким образом, *p—n-переход по отношению к току оказывается несимметричным: в прямом направлении сопротивление перехода значительно меньше, чем в обратном.* Данное свойство p–n-перехода используют для выпрямления переменного тока. На протяжении половины периода, когда потенциал полупроводника p-типа положителен, ток свободно проходит через p- n-переход. В следующую половину периода ток практически равен нулю.

Рис. 196



80. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ДИОД

В настоящее время для выпрямления электрического тока в радиосхемах наряду с двухэлектродными электронными лампами все больше применяют полупроводниковые диоды, так как они обладают рядом преимуществ.

В электронной лампе носители заряда — электроны — возникают за счет термоэлектронной эмиссии. Это требует специального источника электрической энергии для накаливания нити катода.

В p—n-переходе носители заряда образуются при введении в кристалл акцепторной или донорной примеси. Таким образом, здесь отпадает необходимость использования источника энергии для получения свободных носителей заряда. В сложных схемах полученная за счет этого экономия энергии оказывается весьма значительной.

Полупроводниковые выпрямители при тех же значениях выпрямленного тока более миниатюрны, чем электронные лампы. Вследствие этого радиоустройства, собранные на полупроводниках, компактнее.

Отмеченные преимущества полупроводниковых элементов особенно существенны при использовании их в искусственных спутниках Земли, космических кораблях, электронно-вычислительных машинах.

Полупроводниковые диоды изготовляют из германия, кремния, селена и других веществ.

Рассмотрим, как создается p - n-переход при использовании в диоде германия, обладающего проводимостью n-типа за счет небольшой добавки донорной примеси. Этот переход не удается получить путем механического соединения двух полупроводников с различными типами проводимости, так как при этом получается слишком большой зазор между полупроводниками.

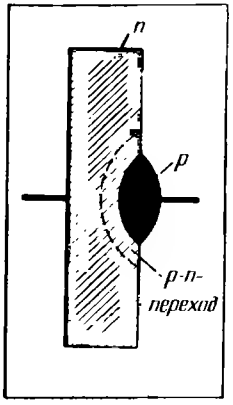


Рис. 197

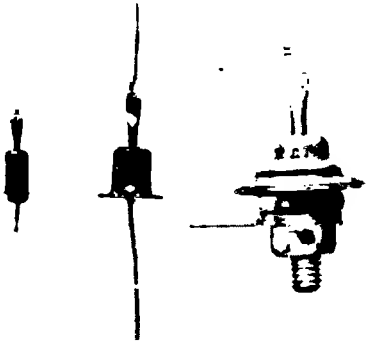


Рис. 198

Толщина же $p-n$-перехода должна быть не больше межатомных расстояний. Поэтому в одну из поверхностей образца вплавляют индий. Вследствие диффузии атомов индия в глубь монокристалла германия у поверхности германия образуется область с проводимостью p-типа. Остальная часть образца германия, в которую атомы индия не проникли, по-прежнему имеет проводимость n-типа. Между двумя областями с проводимостями разных типов и возникает p—n-переход (рис. 197). В полупроводниковом диоде германий служит катодом, а индий — анодом.

Для предотвращения вредных воздействий воздуха и света кристалл германия помещают в герметический металлический корпус (рис. 198).

Полупроводниковые выпрямители обладают высокой надежностью и имеют большой срок службы. Однако они могут работать лишь в ограниченном интервале температур (примерно от -70 до 125°С).

81. ТРАНЗИСТОР

Свойства p—n-перехода в полупроводниках можно использовать для усиления и генерации электрических колебаний. В настоящее время применяются в основном устройства, называемые полупроводниковыми триодами или транзисторами[1].

Рассмотрим один из видов транзисторов из германия или кремния с введенными внутрь них донорными и акцепторными примесями. Распределение примесей таково, что создается очень тонкая (порядка нескольких микрометров) прослойка полупроводника n-типа между двумя слоями полупроводника p-типа (рис. 199). Эту тонкую прослойку называют основанием или базой.

В кристалле образуется два p—n-перехода, прямые направления которых противоположны. Три вывода от областей с различными типами проводимости позволяют включать транзистор в схему, изображенную на рисунке 199. При данном включении левый p—n-переход является прямым и отделяет базу от области с проводимостью p-типа, называемой эмиттером. Если бы не было правого $p-n$-перехода, в цепи «эмиттер — база» существовал бы ток, зависящий от напряжения источников (батареи $Б1$ и источника переменного напряжения) и сопротивления цепи, включая малое сопротивление прямого перехода «эмиттер — база».

Батарея $Б2$ включена так, что правый p—n-переход в схеме (рис. 199) является обратным. Он отделяет базу от правой области с проводимостью p-типа, называемой коллектором.

[1] От английских слов: transfer — переносить, resistor — сопротивление.

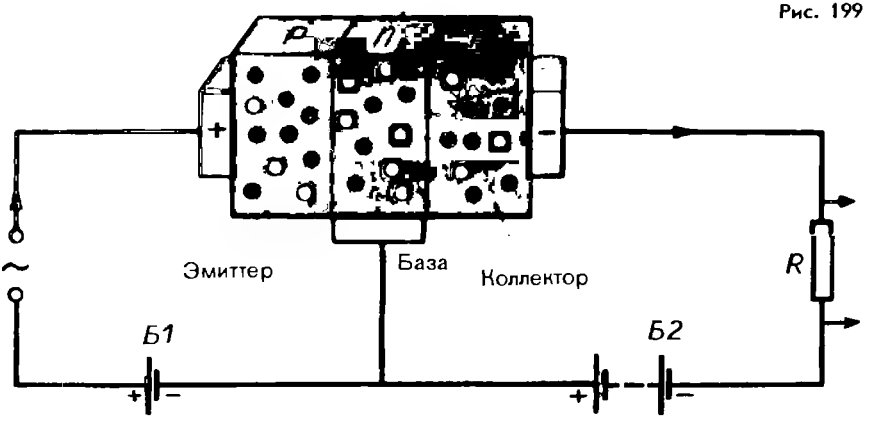
Если бы не было левого $p-n$-перехода, сила тока в цепи коллектора была бы близка к нулю, так как сопротивление обратного перехода очень велико. При существовании же тока в левом $p—n$-переходе появляется ток и в цепи коллектора, причем сила тока в коллекторе лишь немного меньше силы тока в эмиттере.

Дело здесь в следующем. При создании напряжения между эмиттером и базой основные носители полупроводника p-типа — дырки — проникают в базу, где они являются уже неосновными носителями. Поскольку толщина базы очень мала и число основных носителей (электронов) в ней не велико, попавшие в нее дырки почти не рекомбинируют с электронами базы и проникают в коллектор за счет диффузии. Правый $p—n$-переход закрыт для основных носителей заряда базы — электронов, но не для дырок. В коллекторе дырки увлекаются электрическим полем и замыкают цепь. Сила тока, ответвляющегося в цепь эмиттера из базы, очень мала, так как площадь сечения базы в горизонтальной (по рисунку 199) плоскости много меньше сечения в вертикальной плоскости.

Сила тока в коллекторе, практически равная силе тока в эмиттере, изменяется вместе с током в эмиттере. Сопротивление резистора R мало влияет на ток в коллекторе, и это сопротивление можно сделать достаточно большим. Управляя током эмиттера с помощью источника переменного напряжения, включенного в его цепь, мы получим синхронное изменение напряжения на резисторе R. При большом сопротивлении резистора изменение напряжения на нем может в десятки тысяч раз превышать изменение напряжения сигнала в цепи эмиттера. Это означает усиление напряжения. Одновременно и мощность, выделяющаяся на нагрузке R, будет значительно превышать мощность, расходуемую в цепи эмиттера. Происходит усиление по мощности.

Применения транзисторов. Транзисторы (рис. 200) получили

Рис. 199



чрезвычайно широкое распространение в современной технике. Они заменяют электронные лампы во многих электрических цепях научной, промышленной и бытовой аппаратуры. Портативные радиоприемники, использующие такие приборы, в обиходе называются «транзисторами».

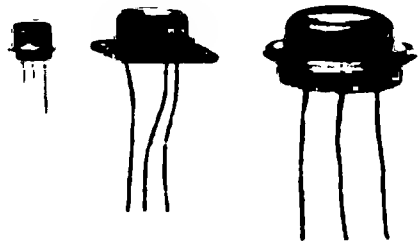


Рис. 200

Преимуществом транзисторов, так же как и полупроводниковых диодов, по сравнению с электронными лампами является прежде всего отсутствие накаленного катода, потребляющего значительную мощность и требующего времени для разогрева. Кроме того, эти приборы в десятки и сотни раз меньше по размерам и массе, чем электронные лампы. Работают они при более низких напряжениях.

Недостатки транзисторов те же, что и полупроводниковых диодов. Они очень чувствительны к повышению температуры, электрическим перегрузкам и сильно проникающим излучениям. Серьезным недостатком является больший пока еще, чем у электронных ламп, разброс параметров транзисторов при их изготовлении. Однако совершенствование технологии и разработка новых конструкций полупроводниковых приборов позволяет надеяться, что этот недостаток будет вскоре изжит.

82. ТЕРМИСТОРЫ И ФОТОРЕЗИСТОРЫ

Термисторы. В полупроводниках электрическое сопротивление в значительной степени зависит от температуры. Это свойство используют для измерения температуры по силе тока в цепи с полупроводником. Такие приборы называют термисторами или терморезисторами.

Термисторы — одни из самых простых полупроводниковых приборов. Выпускаются термисторы в виде стержней, трубок, дисков, шайб и бусинок размером от нескольких микрометров до нескольких сантиметров (рис. 201).

Диапазон измеряемых температур большинства термисторов лежит в интервале от 170 до 570 К. Но существуют термисторы для измерения как очень высоких (≈ 1300 К), так и очень низких ($\approx 4-80$ К) температур.

Термисторы применяются для дистанционного измерения температуры, противопожарной сигнализации и т. д.

Фоторезисторы. Электрическая проводимость полупроводников повышается не только при нагревании, но и при освещении. В этом можно убедиться с помощью установки, схема которой

Рис. 201

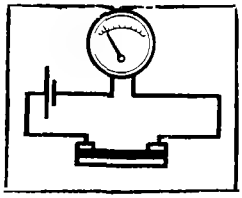


Рис. 202

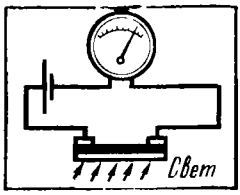


Рис. 203

изображена на рисунке 202. Можно заметить, что при освещении полупроводника (рис. 203) ток в цепи заметно возрастает. Это указывает на увеличение проводимости (уменьшение сопротивления) полупроводников под действием света. Данный эффект не связан с нагреванием, так как может наблюдаться и при неизменной температуре.

Электрическая проводимость возрастает вследствие разрыва связей и образования свободных электронов и дырок за счет энергии света, падающего на полупроводник. Это явление называют фотоэлектрическим эффектом.

Приборы, в которых используют фотоэлектрический эффект в полупроводниках, называют фоторезисторами или фотосопротивлениями. Миниатюрность и высокая чувствительность фоторезисторов позволяют использовать их в самых различных областях науки и техники для регистрации и измерения слабых световых потоков. С помощью фоторезисторов определяют качество поверхностей, контролируют размеры изделий и т. д.

? **1.** В чем состоит различие зависимости сопротивления полупроводников и металлов от температуры? **2.** Какие подвижные носители зарядов имеются в чистом полупроводнике? **3.** Что произойдет при встрече электрона с дыркой? **4.** Почему сопротивление полупроводника очень сильно зависит от наличия примесей? **5.** Какую примесь — донорную или акцепторную — надо ввести, чтобы получить полупроводник n-типа? **6.** Какие носители заряда являются основными, а какие — неосновными в полупроводнике с акцепторной примесью? **7.** Каковы преимущества полупроводникового диода перед вакуумным?

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Наиболее просты количественные закономерности для электрического тока в металлах и электролитах. Задачи на закон Ома, который выполняется для этих проводников, были приведены в предыдущей главе. В данной главе преимущественно рассматриваются задачи на применение закона электролиза. Основной формулой является формула (10.7). Применяется также и более простая формула — (10.5). Надо знать постоянную Фарадея $F = 96\,500$ Кл/моль.

Проводящая сфера радиуса $R=5$ см помещена в электролитическую ванну, наполненную раствором медного купороса. На сколько увеличится масса сферы, если отложение меди длится $t=30$ мин и электрический заряд, поступающий на каждый квадратный сантиметр поверхности сферы за секунду, равен 0,01 Кл? Молярная масса меди $M=0{,}0635$ кг/моль.

Р е ш е н и е. Площадь внешней поверхности $S=4\pi R^2=314$ см^2. Следовательно, заряд, перенесенный ионами за $t=30$ мин $=1800$ с, равен $\Delta q=0{,}01$ Кл/(см$^2\cdot$с)$\cdot 314$ см$^2\cdot 1800$ с$=5652$ Кл. Масса выделившейся меди равна:

$$m=\frac{1}{F}\frac{M}{n}\Delta q; \quad m=1{,}9\cdot 10^{-3} \text{ кг}.$$

Упр. 13

1. Для покрытия цинком металлических изделий в электролитическую ванну помещен цинковый электрод массой $m=0{,}01$ кг. Какой заряд должен пройти через ванну, чтобы электрод полностью израсходовался? Электрохимический эквивалент цинка $k=3{,}4\cdot 10^{-7}$ кг/Кл.

2. При силе тока 1,6 А на катоде электролитической ванны за 10 мин отложилось 0,316 г меди. Определить электрохимический эквивалент меди.

3. Как надо расположить электроды, чтобы электролитическим путем покрыть внутреннюю поверхность полого металлического предмета?

4. При никелировании детали в течение 2 ч сила тока, проходящего через ванну, была 25 А. Электрохимический эквивалент никеля $3\cdot 10^{-7}$ кг/Кл, его плотность $8{,}9\cdot 10^3$ кг/м^3. Какова толщина слоя никеля, если площадь детали 0,2 м^2?

5. Однородное электрическое поле напряженностью $\vec{E}$ создано в металле и в вакууме. Одинаковое ли расстояние пройдет за одно и то же время электрон в том и в другом случае? Начальная скорость его равна нулю.

6. Определить скорости электронов при выходе из электронной пушки при разности потенциалов между анодом и катодом 500 и 5000 В.

КРАТКИЕ ИТОГИ ГЛАВЫ X

Электропроводимость металлов обусловлена свободными электронами (электронная проводимость).

Электропроводимость водных растворов электролитов обусловлена положительными и отрицательными ионами (ионная проводимость). Эти ионы образуются при расщеплении молекул электролитов в процессе растворения (электролитическая диссоциация).

При ионной проводимости прохождение тока сопровождается выделением на электродах веществ, входящих в состав электролитов. Этот процесс, широко применяемый в технике, называют электролизом.

Масса вещества, выделившаяся при электролизе за время Δt, равна:

$$m=\frac{1}{F}\frac{M}{n}I\Delta t,$$

где M — молярная масса вещества, n — валентность, $F=eN_A$ — число Фарадея, N_A — постоянная Авогадро, e — заряд электрона.

Газы при температурах, близких к комнатным, состоят из нейтральных молекул и являются диэлектриками. При нагревании, а также под действием излучения и других факторов возникает ионизация газов. Они становятся проводниками (происходит газовый разряд). Проводимость газов в основном обусловлена положительными ионами и электронами. Разряд, который прекращается после отключения ионизатора, называют несамостоятельным.

Разряд называется самостоятельным, если он существует без действия ионизаторов. При самостоятельном разряде ионы и электроны образуются за счет ионизации электронным ударом, термоэлектронной эмиссии и т. д. Различают следующие типы самостоятельного разряда: тлеющий, дуговой, искровой и коронный.

Для создания тока в вакууме необходимо ввести в вакуумную трубку источник электронов. Обычно таким источником является нагретый катод. Электрический ток в вакууме используется во многих технических устройствах: в диодах для выпрямления переменного тока, в электронолучевых трубках с пучком электронов, управляемым электрическими или магнитными полями. Эти трубки — основные элементы телевизоров и осциллографов.

Широкое применение в радиотехнике получили полупроводники, сопротивление которых уменьшается с увеличением температуры и в очень сильной степени зависит от наличия примесей. Легко осуществляемое управление проводимостью полупроводников позволяет использовать их в полупроводниковых диодах и транзисторах — приборах для усиления и генерации электрических колебаний.

Глава XI.
МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

83. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТОКОВ. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Между неподвижными электрическими зарядами действуют силы, определяемые законом Кулона. Согласно теории близкодействия это взаимодействие осуществляется так: каждый из зарядов создает электрическое поле, поле одного заряда действует на другой заряд и наоборот.

Однако между электрическими зарядами могут существовать силы и иной природы. Их можно обнаружить с помощью следующего опыта. Возьмем два гибких проводника, укрепим их верти-

кально и присоединим нижними концами к полюсам источника тока (рис. 204). Притяжения или отталкивания проводников при этом не обнаружится[1]. Но если другие концы проводников замкнуть проволокой так, чтобы в проводниках возникли токи противоположного направления (рис. 205), то проводники начнут отталкиваться друг от друга. В случае токов одного направления проводники притягиваются (рис. 206).

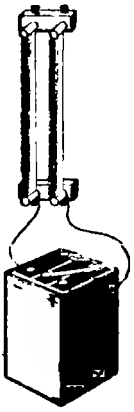


Рис. 204

Взаимодействия между проводниками с током, т. е. взаимодействия между движущимися электрическими зарядами, называют магнитными. Силы, с которыми проводники с током действуют друг на друга, называют магнитными силами. С магнитными взаимодействиями вы знакомились в курсе физики VII класса. В IX классе магнитные силы мы будем изучать более подробно.

Магнитное поле. Согласно теории близкодействия ток в одном из проводников не может непосредственно действовать на другой ток.

Подобно тому как в пространстве, окружающем неподвижные электрические заряды, возникает электрическое поле, в пространстве, окружающем токи, возникает поле, называемое магнитным.

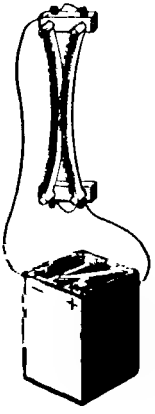
Рис. 205

Электрический ток в одном из проводников создает вокруг себя магнитное поле, которое действует на ток во втором проводнике. А поле, созданное вторым током, действует на первый.

Магнитное поле представляет собой особую форму материи, посредством которой осуществляется взаимодействие между движущимися электрически заряженными частицами.

Основные свойства магнитного поля, устанавливаемые экспериментально, таковы:

Рис. 206



1. *Магнитное поле порождается электрическим током* (движущимися зарядами).

2. *Магнитное поле обнаруживается по действию на ток* (движущиеся заряды).

Подобно электрическому полю, *магнитное поле существует реально, независимо от нас, от наших знаний о нем.* Экспериментальным доказательством реальности магнитного поля, как и реальности электрического поля, является факт существования электромагнитных волн (см. § 41).

[1] Проводники заряжаются от источника тока, но заряды проводников при разности потенциалов между ними в несколько вольт ничтожно малы. Поэтому кулоновские силы никак не проявляются.

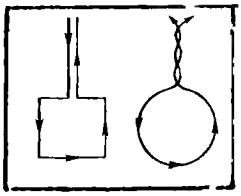


Рис. 207

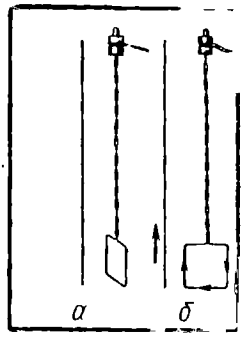


Рис. 208

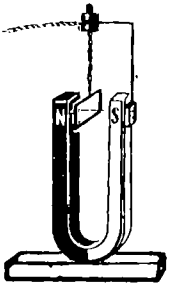


Рис. 209

Замкнутый контур с током в магнитном поле. Для исследования магнитного поля, казалось бы, удобно взять очень малый элемент тока, т. е. малый отрезок тонкого проводника с током, подобно тому как для исследования электрического поля использовалось небольшое заряженное тело. Однако постоянный ток в отрезке проводника не может существовать, потому что любая цепь, по которой идет постоянный ток, всегда замкнута.

Для изучения магнитного поля лучше всего взять замкнутый контур малых (по сравнению с расстояниями, на которых магнитное поле заметно изменяется) размеров. Например, можно взять маленькую плоскую проволочную рамку произвольной формы (рис. 207). Подводящие ток проводники нужно расположить близко друг к другу или сплести вместе. Тогда результирующая сила, действующая со стороны магнитного поля на эти проводники, будет равна нулю.

Выяснить характер действия магнитного поля на контур с током можно с помощью следующего опыта. Подвесим на тонких гибких проводниках, сплетенных вместе, маленькую плоскую рамку, состоящую из нескольких витков проволоки. На расстоянии, значительно большем размеров рамки, расположим вертикальный провод (рис. 208, *а*). При пропускании тока через провод и рамку рамка поворачивается и располагается так, что провод оказывается в плоскости рамки (рис. 208, *б*). При изменении направления тока в проводе рамка повернется на 180°

Из курса физики VII класса известно, что магнитное поле создается не только электрическим током, но и постоянными магнитами. Если мы подвесим на гибких проводах рамку с током между полюсами магнита, то рамка будет поворачиваться до тех пор, пока плоскость ее не установится перпендикулярно к линии, соединяющей полюса магнита (рис. 209). Таким образом, *магнитное поле оказывает на рамку с током ориентирующее действие*[1].

[1] Однородное магнитное поле, т. е. поле, которое одинаково во всех точках пространства, где расположена рамка с током, оказывает на рамку, как показывает опыт, лишь ориентирующее действие. В неоднородном поле рамка, кроме того, будет двигаться поступательно, притягиваясь к проводнику с током или отталкиваясь от него.

84. ВЕКТОР МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Электрическое поле характеризуется векторной величиной — напряженностью электрического поля. Для характеристики магнитного поля необходимо ввести особую физическую величину.

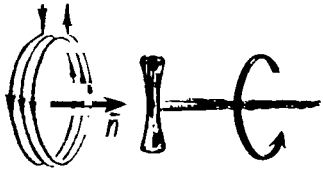


Рис. 210

Мы видели, что в магнитном поле рамка с током на гибком подвесе, со стороны которого не действуют силы упругости, препятствующие ориентации рамки, поворачивается до тех пор, пока не устанавливается строго определенным образом. Из курса физики VII класса известно, что так же ведет себя и магнитная стрелка. Это говорит о том, что величина, характеризующая магнитное поле, должна быть векторной, а направление вектора должно быть связано с ориентацией рамки или магнитной стрелки. *Векторную величину, характеризующую магнитное поле, называют вектором магнитной индукции.* Обозначают этот вектор буквой $\vec{B}$.

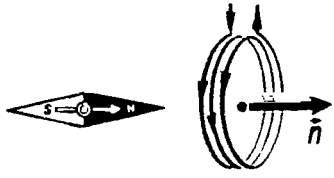


Рис. 211

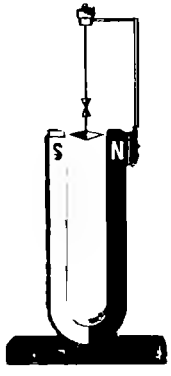
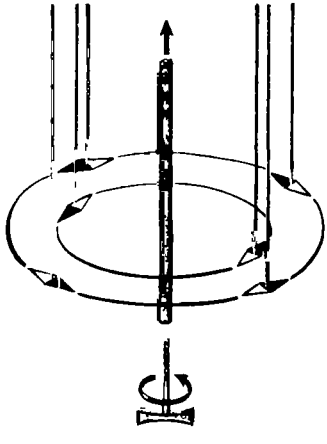


Рис. 212

Направление вектора магнитной индукции. Установим правило, определяющее направление вектора $\vec{B}$. **За направление вектора магнитной индукции в том месте, где расположена рамка с током, принимают направление перпендикуляра (нормали $\vec{n}$) к рамке. Перпендикуляр проводят в ту сторону, куда перемещался бы буравчик (правый винт), если вращать его по направлению тока в рамке** (рис. 210).

Рис. 213



Таким образом, имея небольшую рамку с током и предоставив ей возможность свободно поворачиваться в магнитном поле, можно определить направление вектора магнитной индукции в любой точке. Для этого нужно только подождать, когда повернувшаяся рамка успокоится.

Направление вектора магнитной

индукции можно определить также с помощью магнитной стрелки. Стрелка представляет собой маленький продолговатый постоянный магнит с двумя полюсами — южным S и северным N — на концах. Если стрелка может свободно ориентироваться в пространстве, то в магнитном поле направление линии, проведенной через центр стрелки от S к N (рис. 211), совпадает с направлением нормали n к рамке. Но направление этой нормали, связанное правилом правого винта с направлением тока в рамке, принято за направление вектора, характеризующего магнитное поле. Следовательно, и направление от S к N свободно устанавливающейся стрелки можно принять за направление вектора магнитной индукции.

Используя стрелку, можно повторить те опыты, которые были проделаны с рамкой в магнитном поле постоянного магнита (рис. 212) и прямого провода с током.

В магнитном поле прямолинейного проводника с током магнитная стрелка устанавливается по касательной к окружности (рис. 213). Плоскость окружности перпендикулярна проводу, а центр ее лежит на оси провода. Направление вектора магнитной индукции тока устанавливают с помощью правила буравчика. Правило буравчика состоит в следующем: если направление поступательного движения буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то направление вращения ручки буравчика совпадает с направлением вектора магнитной индукции.

Опыт по определению направления вектора индукции магнитного поля Земли делает каждый, кто ориентируется на местности по компасу.

85. ЛИНИИ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Линии магнитной индукции. Наглядную картину магнитного поля можно получить, если построить так называемые линии магнитной индукции. **Линиями магнитной индукции называют линии, касательные к которым направлены так же, как и вектор B в данной точке поля** (рис. 214). В этом отношении линии магнитной индукции аналогичны линиям напряженности электростатического поля.

Построим линии магнитной индукции для магнитного поля прямолинейного проводника с током. Из приведенных ранее опытов следует, что линиями магнитной индукции в данном случае будут концентрические окружности, лежащие в плоскости, перпендикулярной проводнику с током. Центр окружностей находится на оси проводника (рис. 215). Стрелки на линиях указывают, в какую сторону направлен вектор индукции, касательный к данной линии. Как и в случае линий напряженности

электрического поля, линии магнитной индукции проводят так, чтобы их густота была тем больше, чем сильнее поле в данном участке пространства.

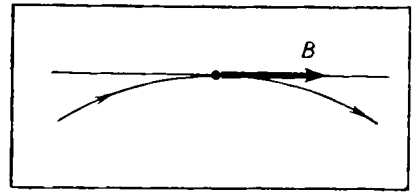


Рис. 214

Приведем еще картину магнитного поля катушки с током (соленоида). Построенная с помощью магнитных стрелок или малых контуров с током картина линий магнитной индукции показана на рисунке 216 (соленоид дан в разрезе). Если длина соленоида много больше его диаметра, то поле внутри соленоида можно считать однородным. Линии магнитной индукции такого поля *параллельны, их густота* везде одинакова.

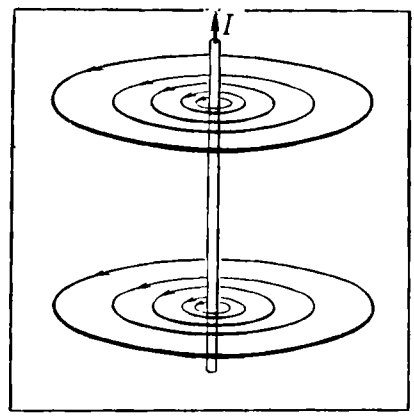


Рис. 215

Картину линий магнитной индукции можно сделать «видимой», воспользовавшись мелкими железными опилками. С этим методом вы уже знакомы из курса физики VII класса.

В магнитном поле каждый из насыпанных на лист картона кусочков железа намагничивается и ведет себя как маленькая стрелка. Наличие большого количества стрелок позволяет в большем числе точек определить направление магнитного поля и, следовательно, более точно выяснить расположение линий магнитной индукции. Некоторые из картин магнитного поля, полученных с помощью железных опилок, приведены на рисунках 217—220.

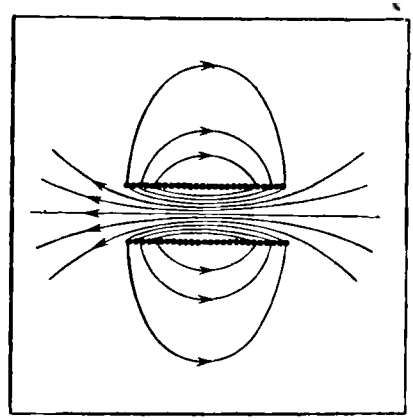


Рис. 216

Вихревое поле. *Важная особенность линий магнитной индукции состоит в том, что они не имеют ни начала, ни конца. Они всегда замкнуты.* Вспомним, что с электрическим полем дело обстоит иначе. Силовые линии его во всех случаях начинаются на положительных зарядах и кончаются на отрицательных.

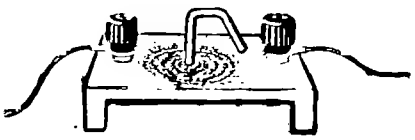


Рис. 217

Рис. 219

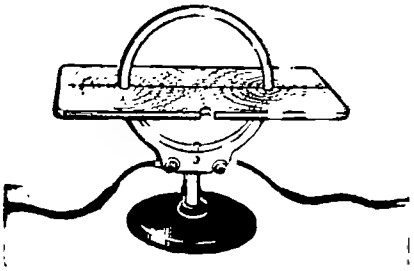


Рис. 218

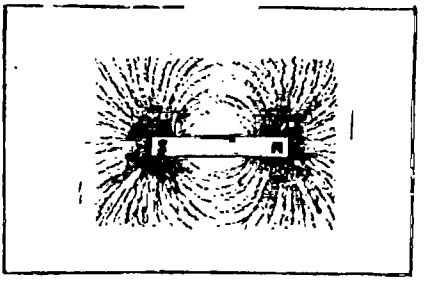


Рис. 220

Поля с замкнутыми силовыми линиями называются вихревыми. Магнитное поле — вихревое поле.

Замкнутость линий магнитной индукции представляет собой фундаментальное свойство магнитного поля. Оно заключается в том, что *магнитное поле не имеет источников. Магнитных зарядов, подобных электрическим, в природе нет.*

? **1.** Какие силы называют магнитными? **2.** Перечислите основные свойства магнитного поля. **3.** Как движутся замкнутый контур с током и магнитная стрелка в однородном магнитном поле? **4.** Укажите способ определения направления вектора магнитной индукции. **5.** Что называется линиями магнитной индукции? **6.** Какие поля называют вихревыми?

86. ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Момент сил, действующих на контур с током. Согласно законам механики поворот тела вокруг своей оси вызывается действием на него момента сил. Следовательно, тот факт, что под влиянием магнитного поля контур с током поворачивается (ориентирующее действие магнитного поля, § 83), означает действие на контур со стороны магнитного поля момента сил.

Этот момент зависит от расположения контура по отношению к вектору магнитной индукции $\vec{B}$. Если нормаль к контуру совпадает с направлением вектора $\vec{B}$, то момент сил, очевидно, равен нулю, так как контур в этом положении не поворачивается. Момент сил возрастает по мере увеличения угла между $\vec{n}$ и $\vec{B}$. Можно опытным путем доказать, что максимальное значение

момента сил будет при угле 90°, когда линии магнитной индукции лежат в плоскости контура[1].

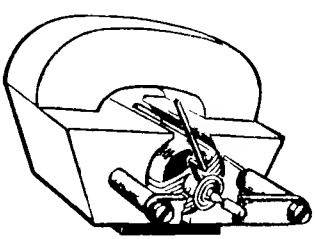
Электроизмерительные приборы. Ориентирующее действие магнитного поля на контур с током используется в электроизмерительных приборах магнитоэлектрической системы.

Измерительный прибор такой системы устроен следующим образом. На легкой алюминиевой рамке прямоугольной формы с прикрепленной к ней стрелкой намотана катушка. Рамка укреплена на двух полуосях. В положении равновесия ее удерживают две тонкие спиральные пружины (на рисунке 221 видна одна из них). Момент сил упругости со стороны пружин, возвращающий катушку в положение равновесия, пропорционален углу отклонения стрелки от положения равновесия. Катушку помещают между полюсами постоянного магнита с наконечниками специальной формы.

Внутри катушки расположен цилиндр из мягкого железа. Такая конструкция обеспечивает радиальное направление линий магнитной индукции в той области, где находятся витки катушки (рис. 222). В результате при любом положении катушки момент сил, действующих на нее со стороны магнитного поля, максимален и при неизменной силе тока один и тот же. Катушка с током поворачивается до тех пор, пока момент сил упругости со стороны пружины не уравновесит момента сил, действующих на рамку со стороны магнитного поля. Увеличивая силу тока в два раза, мы обнаружим, что стрелка поворачивается на угол, вдвое больший, и т. д. Это означает, что максимальный момент сил M, действующих на катушку со стороны магнитного поля, прямо пропорционален силе тока: $M \sim I$. Благодаря этому можно определять силу тока по углу поворота катушки, если проградуировать прибор. Для этого надо установить, каким углам поворота стрелки соответствуют известные значения силы тока.

[1] Момент сил, действующих на контур с несколькими витками, очевидно, прямо пропорционален числу витков N. Ведь магнитное поле действует на каждый виток одинаковым образом, и на контур с N витками будет действовать в N раз больший момент сил.

Рис. 221



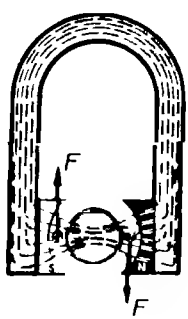


Рис. 222

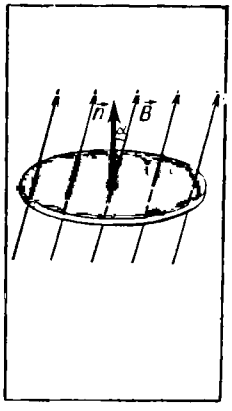


Рис. 223

87. МОДУЛЬ ВЕКТОРА МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ. МАГНИТНЫЙ ПОТОК

Модуль вектора магнитной индукции. Экспериментируя с контурами различной площади, можно установить, что угол поворота стрелки при неизменной силе тока прямо пропорционален площади контура S. Так как угол поворота определяется моментом сил, действующих на контур со стороны магнитного поля, то $M \sim S$. Таким образом, момент сил, действующих на контур с током, пропорционален силе тока в контуре и его площади: $M \sim IS$. Этот опытный факт можно использовать для определения модуля вектора магнитной индукции. В самом деле, поскольку максимальный момент сил пропорционален силе тока в контуре и его площади, то **отношение**

$$\frac{M}{IS} = B \qquad (11.1)$$

не зависит от свойств контура и характеризует магнитное поле в данном участке пространства[1]. Эта величина представляет собой модуль вектора магнитной индукции. Магнитное поле полностью характеризуется вектором магнитной индукции $\vec{B}$. В каждой точке поля могут быть определены направление вектора магнитной индукции и его модуль с помощью измерения момента сил, действующих на контур с током.

Закон, определяющий магнитную индукцию малого элемента тока, довольно сложен, и мы его рассматривать не будем.

Единица магнитной индукции. За единицу магнитной индукции принята магнитная индукция поля, в котором на контур площадью 1 м^2 при силе тока 1 А действует со стороны поля максимальный момент сил $M = 1$ Н·м:

$$1 \text{ ед. магнитной индукции} = 1 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А} \cdot \text{м}^2} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}.$$

Единица магнитной индукции получила название тесла (обозначается Тл) в честь югославского ученого-электротехника Н. Тесла.

Магнитометр. На практике в приборах для измерения магнитной индукции — магнитометрах — вместо контура с током используют небольшой магнит. О магнитной индукции судят по моменту сил, действующих на магнит со стороны магнитного поля.

[1] Аналогично отношение силы, действующей на заряд со стороны электрического поля, к заряду не зависит от заряда и поэтому характеризует электрическое поле в данной точке пространства.

Магнитный поток. Вектор магнитной индукции $\vec{B}$ характеризует магнитное поле в каждой точке пространства. Можно ввести еще одну величину, зависящую от значений модуля вектора $\vec{B}$ не в одной точке, а во всех точках поверхности, ограниченной плоским замкнутым контуром.

Для этого рассмотрим плоский замкнутый проводник (контур) с площадью поверхности S, помещенный в однородное магнитное поле. Нормаль $\vec{n}$ к плоскости проводника составляет угол α с направлением вектора магнитной индукции $\vec{B}$ (рис. 223). **Магнитным потоком Φ через поверхность площади S называют величину, равную произведению модуля вектора магнитной индукции $\vec{B}$ на площадь S и косинус угла α между векторами $\vec{B}$ и $\vec{n}$** (нормалью к поверхности):

$$\Phi = BS\cos\alpha. \qquad (11.2)$$

Произведение $B\cos\alpha = B_n$ представляет собой проекцию вектора магнитной индукции на нормаль к плоскости контура. Поэтому

$$\Phi = B_n S. \qquad (11.3)$$

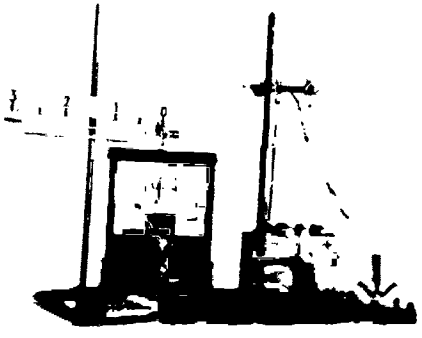
Магнитный поток наглядно можно истолковать как величину, пропорциональную числу линий магнитной индукции, пронизывающих поверхность площади S.

88. ЗАКОН АМПЕРА

Магнитное поле действует на все участки проводника с током. Закон, определяющий силу, действующую на отдельный участок проводника (элемент тока), был установлен в 1820 г. Ампером[1]. Так как создать обособленный элемент тока нельзя, то Ампер проводил опыты с замкнутыми проводниками. Меняя форму проводников и их расположение, Ампер сумел установить выражение для силы, действующей на отдельный элемент тока.

Модуль силы Ампера. Выяснить, от чего зависит сила, действующая на проводник с током в магнитном поле, можно с помощью установки, изображенной на рисунке 224.

Рис. 224



[1] Точнее говоря, Ампер установил закон для силы взаимодействия между двумя небольшими участками (элементами) проводников с током. Он был сторонником теории дальнодействия и не пользовался понятием поля. Однако по традиции и в память о заслугах ученого выражение для магнитной силы, действующей на проводник с током со стороны магнитного поля, также называют законом Ампера.

Ампер Андре Мари (1775—1836) — великий французский физик и математик, один из основоположников электродинамики. Ампер ввел в физику понятие «электрический ток» и построил первую теорию магнетизма, основанную на гипотезе молекулярных токов, открыл механическое взаимодействие электрических токов и установил количественные соотношения для силы этого взаимодействия. Максвелл назвал Ампера «Ньютоном электричества». Ампер работал также в области механики, теории вероятностей и математического анализа.

Магнитное поле создается постоянным магнитом и действует в основном на горизонтальный проводник. Сила измеряется с помощью специальных весов, связанных с проводником двумя стерженьками.

Увеличивая силу тока в два раза, можно заметить, что и действующая на проводник сила также увеличивается в два раза. Прибавив еще один магнит, мы примерно в два раза увеличиваем длину той части проводника, на которую действует магнитное поле. Сила при этом также увеличивается приблизительно в два раза. Используя разные магниты, можно установить, что магнитная сила (сила Ампера) прямо пропорциональна модулю вектора $\vec{B}$.

Наконец, сила Ампера зависит от угла, образованного вектором $\vec{B}$ с проводником. В этом можно убедиться, меняя наклон подставки, на которой находятся магниты, так, чтобы изменялся угол между проводником и линиями магнитной индукции.

Конечно, все сделанные нами заключения носят качественный характер. Дадим теперь точную формулировку закона Ампера.

Пусть вектор магнитной индукции $\vec{B}$ составляет с направлением отрезка проводника с током (элементом тока) угол α (рис. 225). (За направление элемента тока принимают направление, в котором по проводнику течет ток.) Опыт показывает, что магнитное поле, вектор индукции которого направлен вдоль проводника с током, не оказывает никакого действия на ток. Поэтому модуль силы зависит лишь от модуля составляющей вектора $\vec{B}$, перпендикулярной проводнику, т. е. от $B_\perp = B\sin\alpha$, и не зависит от составляющей $\vec{B}$, направленной вдоль проводника. Выражение для модуля F силы, действующей на малый отрезок проводника Δl,

по которому течет ток I, со стороны магнитного поля с индукцией $\vec{B}$, составляющей с элементом тока угол α, имеет вид:

$$F = B|I|\Delta l \sin\alpha. \qquad (11.4)$$

Это выражение называют законом Ампера.

Направление силы Ампера. В рассмотренном выше опыте вектор $\vec{F}$ перпендикулярен элементу тока и вектору $\vec{B}$. Его направление определяется правилом левой руки. Заключается оно в следующем:

если левую руку расположить так, чтобы перпендикулярная к проводнику составляющая вектора индукции $\vec{B}$ входила в ладонь, а четыре вытянутых пальца были направлены по току, то отогнутый на 90° большой палец покажет направление действующей на отрезок проводника силы (рис. 226).

Применение закона Ампера. Зная направление и модуль силы, действующей на любой участок проводника, можно вычислить силу, действующую на весь замкнутый проводник. Для этого надо найти сумму сил, действующих на все участки проводника. Полная уверенность в справедливости закона Ампера вытекает из того, что вычисленное таким образом значение результирующей силы для любого замкнутого проводника совпадает с экспериментально определяемым значением силы.

Закон Ампера используется для расчета сил, действующих на проводники с током, во многих технических устройствах, в частности в электродвигателях.

Действие всех электродвигателей основано на использовании силы Ампера. По обмотке вращающейся части двигателя (ротора) протекает электрический ток. Мощный электромагнит создает магнитное поле, которое действует на проводники с током и заставляет их двигаться. Ротор изготовляется из стальных пластин, а полюсам электромагнита придается специальная форма, с тем чтобы сконцентрировать магнитную индукцию в местах, где располагается обмотка ротора.

Специальные устройства обеспечивают такое направление токов в обмотках, чтобы магнитное взаимодействие создавало момент силы, приводящий к непрерывному вращению ротора.

Рис. 225

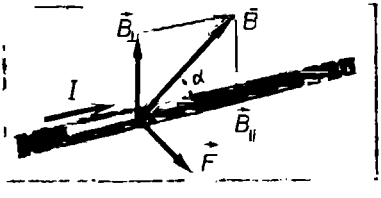
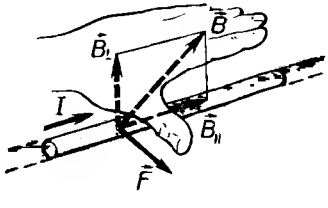


Рис. 226



89. ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ДВИЖУЩИЙСЯ ЗАРЯД. СИЛА ЛОРЕНЦА

Электрический ток представляет собой совокупность упорядоченно движущихся заряженных частиц. Поэтому действие магнитного поля на проводник с током есть результат действия поля на движущиеся заряженные частицы внутри проводника.

Силу, действующую на движущуюся заряженную частицу со стороны магнитного поля, называют силой Лоренца, в честь великого голландского физика Г. Лоренца, основателя электронной теории строения вещества. Эту силу можно найти с помощью закона Ампера. Модуль силы Лоренца равен отношению модуля F силы, действующей на участок проводника длиной Δl, к числу N упорядоченно движущихся заряженных частиц в этом участке проводника:

$$F_1 = \frac{F}{N}. \qquad (11.5)$$

Рассмотрим отрезок тонкого прямого проводника с током (рис. 227). Пусть длина отрезка Δl и площадь поперечного сечения проводника S настолько малы, что вектор индукции магнитного поля $\vec{B}$ можно считать неизменным в пределах отрезка проводника. Сила тока I в проводнике связана с зарядом частицы q_0, концентрацией заряженных частиц (числом зарядов в единице объема) n и скоростью их упорядоченного движения v следующей формулой (см. § 56):

$$I = q_0 n v S. \qquad (11.6)$$

Модуль силы, действующей со стороны магнитного поля на выбранный элемент тока, равен:

$$F = |I| \Delta l B \sin\alpha.$$

Подставляя сюда выражение (11.6) для силы тока, получим:

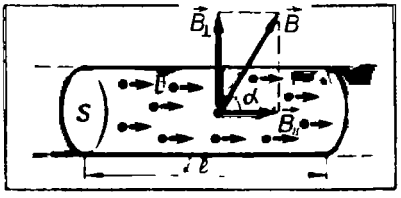
$$F = |q_0| n v S \Delta l B \sin\alpha = v |q_0| N B \sin\alpha,$$

где $N = nS\Delta l$ — число заряженных частиц в рассматриваемом объеме. Следовательно, на каждый движущийся заряд со стороны магнитного поля действует сила Лоренца

$$\boxed{F_1 = \frac{F}{N} = |q_0| v B \sin\alpha,} \qquad (11.7)$$

где α — угол между вектором скорости и вектором магнитной индукции. *Сила Лоренца перпендикулярна векторам* $\vec{B}$ и v, и ее направление определяется с помощью того же пра-

Рис. 227



вила левой руки, что и направление силы Ампера.

Если левую руку расположить так, чтобы составляющая магнитной индукции $\vec{B}$, перпендикулярная скорости заряда, входила в ладонь, а четыре пальца были направлены по движению положительного заряда (против движения отрицательного), то отогнутый на 90° большой палец покажет направление действующей на заряд силы Лоренца $\vec{F}_L$ (рис. 228).

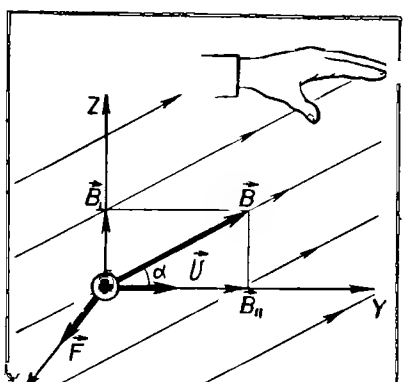


Рис. 228

Электрическое поле действует на заряд q_0 с силой $\vec{F}_{эл} = q_0\vec{E}$. Следовательно, если есть и электрическое поле и магнитное, то полная сила $\vec{F}$, действующая на заряд, равна[1]:

$$\vec{F} = \vec{F}_{эл} + \vec{F}_L. \qquad (11.8)$$

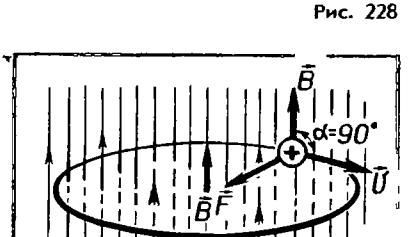


Рис. 229

Так как сила Лоренца перпендикулярна скорости частицы, то она не совершает работы. Согласно теореме о кинетической энергии (см. учебник физики для VIII класса) это означает, что сила Лоренца не меняет кинетической энергии частицы и, следовательно, модуля ее скорости. Под действием силы Лоренца меняется лишь направление скорости частицы.

Действие силы Лоренца на движущиеся электроны можно наблюдать, поднося электромагнит (или постоянный магнит) к электроннолучевой трубке. Меняя ток в электромагните, можно заметить, что отклонение электронного луча растет с увеличением модуля B магнитной индукции поля. При изменении направления тока в электромагните отклонение луча происходит в противоположную сторону.

Зависимость силы Лоренца от угла α между векторами B и $\vec{v}$ можно обнаружить, наблюдая смещение электронного луча при изменении угла между осью магнита и осью электронной трубки.

Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле. Рассмотрим движение частицы с зарядом q_0 в однородном маг-

[1] Часто силой Лоренца называют полную силу (11.8), действующую на заряженную частицу со стороны электромагнитного поля. В этом случае силу (11.7) называют магнитной частью силы Лоренца.

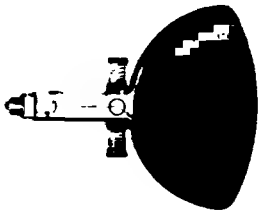


Рис. 230

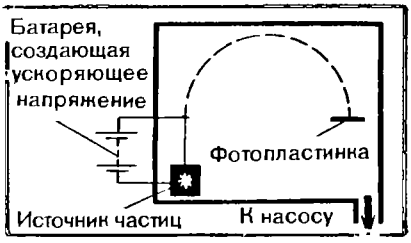


Рис. 231

нитном поле $\vec{B}$, направленном перпендикулярно к начальной скорости частицы $\vec{v}$ (рис. 229). Сила Лоренца зависит от модуля скорости частицы и индукции поля. Так как магнитное поле не меняет модуля скорости, то остается неизменным и модуль силы Лоренца. Эта сила перпендикулярна скорости и, следовательно, определяет центростремительное ускорение частицы. Неизменность по модулю центростремительного ускорения частицы, движущейся с постоянной по модулю скоростью, означает, что частица равномерно движется по окружности радиуса r. Определим этот радиус. Согласно второму закону Ньютона (рис. 229)

$$m\frac{v^2}{r}=|q_0|vB$$

Отсюда

$$r=\frac{mv}{|q_0|B}. \qquad (11.9)$$

Применение силы Лоренца. Действие магнитного поля на движущийся заряд широко используют в современной технике. Достаточно упомянуть телевизионные трубки (кинескопы), в которых летящие к экрану электроны отклоняются с помощью магнитного поля, создаваемого особыми катушками (рис. 230).

Другое применение действие магнитного поля нашло в приборах, позволяющих разделять заряженные частицы по их удельным зарядам, т. е. по отношениям заряда частицы к ее массе, и по полученным результатам точно определять массы частиц. Такие приборы получили название масс-спектрографов.

На рисунке 231 изображена принципиальная схема простейшего масс-спектрографа. Вакуумная камера прибора помещена в магнитное поле (вектор индукции $\vec{B}$ перпендикулярен рисунку). Ускоренные электрическим полем заряженные частицы (электроны или ионы), описав дугу, попадают на фотопластинку, где оставляют след, позволяющий с большой точностью измерить r. По известному радиусу траектории определяется удельный заряд иона. Зная же заряд иона, легко определить его массу.

? **1.** Каков принцип действия электроизмерительных приборов магнитоэлектрической системы? **2.** Как определяется модуль вектора магнитной индукции? **3.** Что называют потоком магнитной индукции? **4.** Чему равен модуль силы Ампера? **5.** Сформулируйте правило для определения направления силы Ампера. **6.** Сформулируйте правило для определения направления силы Лоренца. **7.** Чему равен модуль силы Лоренца? **8.** Почему сила Лоренца не меняет модуля скорости заряженной частицы? **9.** Как движется заряженная частица в однородном магнитном поле, если начальная скорость частицы перпендикулярна линиям магнитной индукции?

90. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА

Магнитная проницаемость. Вы знаете, что магнитное поле создается не только электрическими токами, но и постоянными магнитами. Постоянные магниты могут быть изготовлены лишь из немногих веществ, но все вещества, помещенные в магнитное поле, намагничиваются, т. е. сами создают магнитное поле. Благодаря этому вектор магнитной индукции $\vec{B}$ в однородной среде отличается от вектора $\vec{B}_0$ в той же точке пространства в вакууме.

Отношение $\frac{B}{B_0}=\mu$, характеризующее магнитные свойства среды, получило название *магнитной проницаемости среды*.

Итак, в однородной среде магнитная индукция равна:

$$\vec{B}=\mu\vec{B}_0, \qquad (11.10)$$

где μ — магнитная проницаемость[1].

Гипотеза Ампера. Причина, вследствие которой тела обладают магнитными свойствами, была впервые найдена французским ученым Ампером. Сначала под непосредственным впечатлением от наблюдения поворачивающейся вблизи проводника с током магнитной стрелки в опытах Эрстеда Ампер предположил, что магнетизм Земли вызван токами, текущими внутри земного шара. Главный шаг был сделан: **магнитные свойства тела можно объяснить циркулирующими внутри него токами.** Далее Ампер пришел к общему заключению: **магнитные свойства любого тела определяются замкнутыми электрическими токами внутри него.** Этот решающий шаг от возможности объяснения магнитных свойств тел токами к категорическому утверждению, что магнитные взаимодействия — это взаимодействия токов,— свидетельство большой научной смелости Ампера.

---

[1] Формула (11.10) справедлива только для однородной среды, заполняющей все пространство, или для случаев особой симметрии тела, например для однородного стержня внутри соленоида. Если тело имеет произвольную форму, то при внесении его в магнитное поле с индукцией $\vec{B}_0$ индукция внутри вещества не будет определяться формулой (11.10). Зависимость между $\vec{B}$ и $\vec{B}_0$ гораздо сложнее и определяется формой тела и его ориентацией по отношению к $\vec{B}_0$.

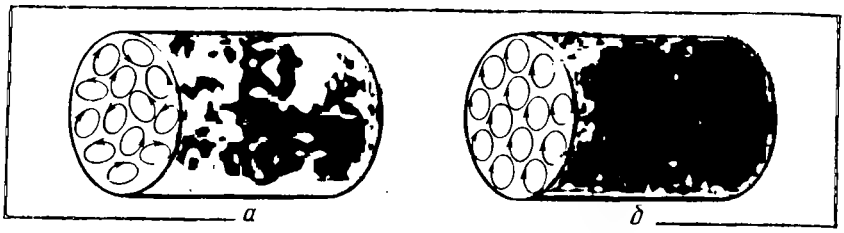


Рис. 232

Согласно гипотезе Ампера внутри молекул и атомов циркулируют элементарные электрические токи. (Теперь мы хорошо знаем, что эти токи образуются вследствие движения электронов в атомах.) Если плоскости, в которых циркулируют эти токи, расположены вследствие беспорядочного теплового движения молекул хаотически по отношению друг к другу (рис. 232, *а*), то их действие взаимно компенсируется и никаких магнитных свойств тело не обнаруживает. В намагниченном состоянии элементарные токи в теле ориентированы так, что их действия складываются (рис. 232, *б*).

Гипотеза Ампера объясняет, почему магнитная стрелка и рамка (контур) с током в магнитном поле ведут себя одинаково (см. § 83). Стрелку можно рассматривать как совокупность маленьких контуров с током, ориентированных одинаково.

В телах с большой магнитной проницаемостью ($\mu \gg 1$), называемых ферромагнитными (железо, кобальт, никель, гадолиний и многие сплавы), магнитные поля, однако, создаются не вследствие вращательного движения электронов вокруг ядер, а вследствие «собственного вращения». Электрон всегда как бы вращается вокруг своей оси и, обладая зарядом, создает магнитное поле наряду с полем, появляющимся за счет орбитального движения[1].

Ферромагнетики и их применения. Хотя ферромагнитных тел в природе не так уж много, именно они имеют наибольшее практическое значение. Вставляя железный или стальной сердечник в катушку, можно во много раз усилить создаваемое ею магнитное поле, не увеличивая силу тока в катушке. Сердечники трансформаторов, генераторов, электродвигателей и т. д. изготовляются из ферромагнетиков.

Магнитная проницаемость ферромагнетиков непостоянна[2]. Она зависит от индукции магнитного поля.

---

[1] Добавление «как бы» к слову «вращается» нужно потому, что электрон по своим свойствам не похож на очень маленький шарик. Его движение подчиняется законам квантовой механики, а не классической механики Ньютона. Собственный вращательный момент (момент импульса) электрона называют спином.

[2] О способах измерения магнитной проницаемости ферромагнетиков будет рассказано в следующей главе.

При выключении внешнего магнитного поля ферромагнетик остается намагниченным, т. е. создает магнитное поле в окружающем пространстве. Упорядоченная ориентация элементарных токов не исчезает при выключении внешнего поля. Благодаря этому существуют постоянные магниты.

Постоянные магниты находят широкое применение в электроизмерительных приборах, громкоговорителях и телефонах, звукозаписывающих аппаратах, магнитных компасах и т. д.

Температура Кюри. При температурах, больших некоторой определенной для данного ферромагнетика температуры, его ферромагнитные свойства исчезают. Эту температуру называют температурой Кюри, по имени открывшего это явление французского ученого. Если сильно нагреть намагниченный гвоздь, то он потеряет способность притягивать к себе железные предметы. Температура Кюри для железа 753°С, для никеля 365°С, а для кобальта 1000°С. Существуют ферромагнитные сплавы, у которых температура Кюри меньше 100°С.

Первые детальные исследования магнитных свойств ферромагнетиков были выполнены выдающимся русским физиком А. Г. Столетовым (1839 - 1896).

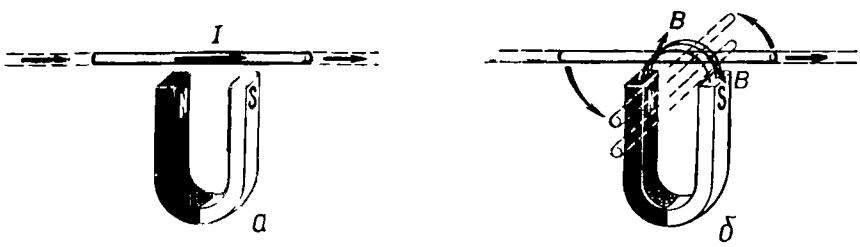
1. Какая величина характеризует магнитные свойства среды? 2. В чем сущность гипотезы Ампера? 3. Какие тела называют ферромагнетиками? 4. Для каких целей применяют ферромагнитные материалы?

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

При решении задач на магнитное поле тока нужно уметь с помощью правила левой руки определять направление силы Ампера при заданных направлениях тока и магнитной индукции (или направление тока по заданному направлению силы Ампера и магнитной индукции). Нужно уметь также определять направление силы Лоренца. Направление магнитной индукции тока определяется по правилу буравчика.

Решение задач с применением закона Ампера и использованием выражения для силы Лоренца нужно проводить так же, как

Рис. 233



и решение задач механики. Нужно только, кроме механических сил, принимать во внимание силу Ампера (11.4) или силу Лоренца (11.7).

1. Прямолинейный провод с током расположен над полюсами дугообразного магнита (рис. 233, *а*). Провод может свободно перемещаться во всех направлениях. Как будет двигаться этот провод?

Р е ш е н и е. Найдем направление векторов магнитной индукции в различных точках и применим правило левой руки. Провод будет поворачиваться в горизонтальной плоскости, а также втягиваться в пространство между полюсами магнита (рис. 233, *б*).

2. Прямоугольная рамка с током, изображенная на рисунке 234, имеет следующие размеры: $a=3$ см; $b=5$ см. Сила тока в рамке $I=10$ А. Индукция магнитного поля $B=0{,}1$ Тл составляет угол $\alpha=30°$ с нормалью к рамке. Определить момент сил, действующих на рамку со стороны магнитного поля.

Р е ш е н и е. На рисунке 235 показан вид сверху на сечение рамки горизонтальной плоскостью. В соответствии с правилом левой руки на стороны рамки длиной b действует пара сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$, перпендикулярных вектору $\vec{B}$, которая создает вращающий момент относительно оси, проходящей через середину рамки. Силы, действующие на стороны длиной a согласно правилу левой руки, лишь растягивают рамку.

По закону Ампера $F_1=F_2=F=|I|Bb$. Плечо каждой из этих сил равно: $d=\frac{a}{2}\sin\alpha$. Суммарный момент сил будет равен: $M=2F\frac{a}{2}\sin\alpha=|I|BS\sin\alpha$, где $S=ab$ — площадь рамки. При $\alpha=90°$ момент сил будет максимальным и совпадет со значением M из формулы (11.1), которая была введена в качестве определения модуля вектора магнитной индукции.

Подставляя числовые значения величин, получим: $M=7{,}5\cdot10^{-4}$ Н·м.

3. В пространстве, где существуют одновременно однородные и постоянные электрическое и магнитное поля, по прямолинейной траектории движется протон. Известно, что напряженность электрического поля равна $\vec{E}$. Какова индукция $\vec{B}$ магнитного поля?

Рис. 234

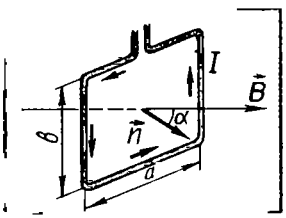
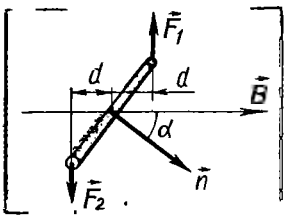


Рис. 235



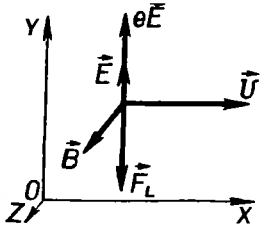


Рис. 236

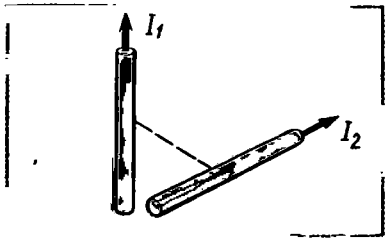


Рис. 237

Решение. Прямолинейное движение протона возможно в двух случаях:

1) Вектор $\vec{E}$ направлен вдоль траектории протона. Тогда вектор $\vec{B}$ также должен быть направлен вдоль траектории и его модуль может быть любым, так как магнитное поле на частицу не будет действовать.

2) Векторы $\vec{E}$, $\vec{B}$ и $\vec{v}$ взаимно перпендикулярны и сила, действующая на протон со стороны электрического поля, равна по модулю и противоположна по направлению силе Лоренца, действующей на протон со стороны магнитного поля (рис. 236). Так как $e\vec{E}+\vec{E}_L=0$, то $eE-evB=0$ и $B=\frac{E}{v}$

Упр. 14

1. Используя правило буравчика и правило левой руки, показать, что одинаково направленные параллельные токи притягиваются, а противоположно направленные — отталкиваются.

2. По двум скрещивающимся под прямым углом прямолинейным проводникам пропускают токи I_1 и I_2 (рис. 237). Как будет изменяться расположение проводников друг относительно друга?

3. Рамка с током, описанная в примере решения задачи 2, повернута так, что нормаль к рамке составляет угол 90° с линиями магнитной индукции. Определить момент сил, действующих на рамку.

4. Проводник длиной $l=0{,}15$ м с током $I=8$ А перпендикулярен вектору индукции однородного магнитного поля, модуль которого $B=0{,}4$ Тл. Найти работу, которая была совершена при перемещении проводника на 0,025 м по направлению действия силы Ампера.

5. Определить направление вектора индукции магнитного поля в горловине кинескопа (рис. 230).

6. Частица с зарядом q и массой m начинает двигаться со скоростью $\vec{v}$ в однородном магнитном поле с индукцией $\vec{B}$. Начальная скорость частицы составляет с вектором $\vec{B}$ угол α. Показать, что траектория частицы представляет собой винтовую линию. Каков радиус этой винтовой линии?

КРАТКИЕ ИТОГИ ГЛАВЫ XI

Взаимодействие между электрическими токами, называемое магнитным, осуществляется посредством магнитного поля. Основной характеристикой магнитного поля является вектор магнитной индукции $\vec{B}$.

За направление вектора магнитной индукции принимается направление нормали к рамке с током, имеющей возможность свободно ориентироваться в магнитном поле. Это направление совпадает с направлением магнитной стрелки в поле, т. е. с направлением линии, проведенной от южного полюса стрелки к северному.

Модуль вектора магнитной индукции определяется отношением максимального момента сил, действующих на рамку (контур) со стороны магнитного поля, к произведению силы тока в нем на его площадь.

Линии магнитной индукции охватывают проводники с током и всегда замкнуты. Поля с замкнутыми линиями называются вихревыми.

Согласно закону Ампера на отрезок проводника с током длины Δl со стороны магнитного поля действует сила, модуль которой равен:

$$F = B|I|\Delta l \sin\alpha.$$

где α — угол между отрезком проводника и вектором B. Направление силы определяется по правилу левой руки.

На движущуюся заряженную частицу действует сила Лоренца, модуль которой равен:

$$F_L = |q_0|vB\sin\alpha,$$

где α — угол между скоростью частицы и вектором магнитной индукции. Сила Лоренца перпендикулярна скорости частицы и поэтому не совершает работы. Эта сила изменяет направление скорости частицы, но не меняет ее кинетической энергии.

Все тела в магнитном поле намагничиваются, т. е. сами создают магнитное поле. Отношение вектора магнитной индукции в однородной среде к магнитной индукции в вакууме называется магнитной проницаемостью и характеризует магнитные свойства вещества $\mu = \frac{B}{B_0}$.

У большинства веществ магнитные свойства выражены слабо.

Лишь у ферромагнитных тел, к которым относится железо, магнитная проницаемость очень велика ($\mu \gg 1$) и зависит от магнитной индукции. Хотя ферромагнетиков сравнительно немного, они имеют очень большое практическое значение, так как позволяют в сотни раз увеличивать магнитную индукцию поля без затрат энергии.

Ферромагнитные материалы применяются для изготовления сердечников трансформаторов, генераторов, электродвигателей и т. д., а также для изготовления постоянных магнитов.

Глава XII.
ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

91. ОТКРЫТИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

До сих пор мы рассматривали электрические и магнитные поля, не изменяющиеся с течением времени. Было выяснено, что электрическое поле создается электрическими зарядами, а магнитное поле — движущимися зарядами, т. е. электрическим током. Перейдем к знакомству с электрическим и магнитным полями, которые меняются со временем.

Самый важный факт, который удалось обнаружить,— это теснейшая взаимосвязь между электрическим и магнитным полями. *Изменяющееся во времени магнитное поле порождает электрическое поле, а изменяющееся электрическое поле порождает магнитное.* Без этой связи между полями разнообразие проявлений электромагнитных сил не было бы столь обширным, каким оно является на самом деле. Не существовало бы ни радиоволн, ни света.

Не случайно первый, решающий шаг в открытии новых свойств электромагнитных взаимодействий был сделан основоположником представлений об электромагнитном поле — Фарадеем. Фарадей был уверен в единой природе электрических и магнитных явлений. Благодаря этому он сделал открытие, которое впоследствии легло в основу устройства генераторов всех электростанций мира, превращающих механическую энергию в энергию электрического тока. (Другие источники: гальванические элементы, аккумуляторы и др.— дают ничтожную долю вырабатываемой энергии.)

Электрический ток, рассуждал Фарадей, способен намагнитить кусок железа. Не может ли магнит, в свою очередь, вызвать появление электрического тока?

Долгое время эту связь обнаружить не удавалось. Трудно было додуматься до главного, а именно: только движущийся магнит или меняющееся во времени магнитное поле может возбудить электрический ток в катушке.

Какого рода случайности могли помешать открытию, показывает следующий факт. Почти одновременно с Фарадеем швейцарский физик Колладон пытался получить электрический ток в катушке с помощью магнита. При работе он пользовался гальванометром, легкая магнитная стрелка которого помещалась внутри катушки прибора. Чтобы магнит не оказывал непосредственного влияния на стрелку, концы катушки, в которую Колладон вдвигал магнит, надеясь получить в ней ток, были выведены в соседнюю комнату и там присоединены к гальванометру. Вставив магнит в катушку, Колладон шел в соседнюю комнату и с огорчением

Рис. 238

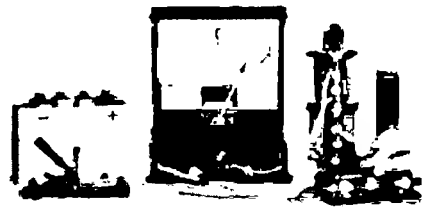


Рис. 239

убеждался, что гальванометр не показывает тока. Стоило бы ему все время наблюдать за гальванометром и попросить кого-нибудь заняться магнитом, замечательное открытие было бы сделано. Но этого не случилось. Покоящийся относительно катушки магнит не вызывает в ней тока.

Явление электромагнитной индукции заключается в возникновении электрического тока в проводящем контуре, который либо покоится в переменном во времени магнитном поле, либо движется в постоянном магнитном поле таким образом, что число линий магнитной индукции, пронизывающих контур, меняется. Оно было открыто 29 августа 1831 г. Редкий случай, когда дата нового замечательного открытия известна так точно. Вот описание первого опыта, данное самим Фарадеем:

«На широкую деревянную катушку была намотана медная проволока длиной в 203 фута[1] и между витками ее намотана проволока такой же длины, но изолированная от первой хлопчатобумажной нитью. Одна из этих спиралей была соединена с гальванометром, а другая — с сильной батареей, состоящей из 100 пар пластин... При замыкании цепи удавалось заметить внезапное, но чрезвычайно слабое действие на гальванометре, и то же самое замечалось при прекращении тока. При непрерывном же прохождении тока через одну из спиралей не удавалось отметить ни действия на гальванометр, ни вообще какого-либо индукционного действия на другую спираль, несмотря на то что нагревание всей спирали, соединенной с батареей, и яркость искры, проскакивающей между углями, свидетельствовали о мощности батареи» (Фарадей М. «Экспериментальные исследования по электричеству», 1-я серия).

Итак, первоначально была открыта индукция в неподвижных друг относительно друга проводниках при замыкании и размыкании цепи. Затем, ясно понимая, что сближение или удаление проводников с током должно приводить к тому же результату, что и замыкание и размыкание цепи, Фарадей с помощью опытов доказал, что ток возникает при перемещении катушек друг отно-

[1] 1 фут равен 304,8 мм.

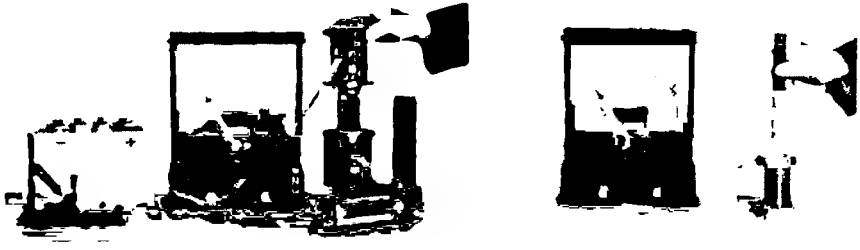


Рис. 240 *а* *б*

сительно друга. Знакомый с трудами Ампера, Фарадей понимал, что магнит — это совокупность маленьких токов, циркулирующих в молекулах. 17 октября, как зарегистрировано в его лабораторном журнале, был обнаружен индукционный ток в катушке во время вдвигания (или выдвигания) магнита. В течение одного месяца Фарадей опытным путем открыл все существенные особенности явления электромагнитной индукции.

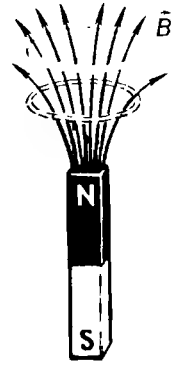
В настоящее время опыты Фарадея может повторить каждый. Для этого надо иметь две катушки, магнит, батарею элементов и достаточно чувствительный гальванометр.

В установке, изображенной на рисунке 238, индукционный ток возникает в одной из катушек при замыкании или размыкании электрической цепи другой катушки, неподвижной относительно первой. В установке на рисунке 239 с помощью реостата меняется сила тока в одной из катушек. На рисунке 240, *а* индукционный ток появляется при движении катушек друг относительно друга, а на рисунке 240, *б* — при движении постоянного магнита относительно катушки.

Уже сам Фарадей уловил то общее, от чего зависит появление индукционного тока в опытах, которые внешне выглядят по-разному.

В замкнутом проводящем контуре возникает ток при изменении числа линий магнитной индукции, пронизывающих площадь, ограниченную этим контуром. И чем быстрее меняется число линий магнитной индукции, тем больше возникающий индукционный ток. При этом причина изменения числа линий магнитной индукции совершенно безразлична. Это может быть и изменение числа линий магнитной индукции, пронизывающих площадь неподвижного проводящего контура вследствие изменения силы тока в соседней катушке (рис. 238), и изменение числа линий индукции вследствие движения контура в неоднородном магнитном поле, густота линий которого меняется в пространстве (рис. 241).

Рис. 241



92. НАПРАВЛЕНИЕ ИНДУКЦИОННОГО ТОКА. ПРАВИЛО ЛЕНЦА

Выясним важный вопрос о направлении индукционного тока.

Присоединив катушку, в которой возникает индукционный ток, к гальванометру, обнаружим, что направление этого тока зависит от того, приближается ли магнит к катушке (например, северным полюсом) или удаляется от нее (рис. 240, *б*).

Возникающий индукционный ток того или иного направления взаимодействует с магнитом. Катушка с протекающим по ней током подобна магниту с двумя полюсами — северным и южным. Направление индукционного тока определяет, какой конец катушки играет роль северного полюса (линии магнитной индукции выходят из него), а какой — южного (линии магнитной индукции входят в него). Опираясь на закон сохранения энергии, можно предсказать, в каких случаях катушка будет притягивать магнит, а в каких — отталкивать его.

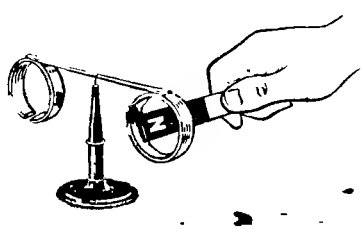
Взаимодействие индукционного тока с магнитом. Если магнит приближать к катушке, то появляющийся в проводнике индукционный ток будет обязательно отталкивать магнит. Для сближения магнита и катушки нужно совершить положительную работу. Катушка становится подобной магниту, обращенному одноименным полюсом к движущемуся магниту. Одноименные же полюсы отталкиваются.

Представьте себе, что дело обстояло бы наоборот. Вы подвинули магнит к катушке, и он сам собой устремился бы внутрь нее. При этом нарушился бы закон сохранения энергии. Ведь кинетическая энергия магнита увеличивалась бы и одновременно возникал бы ток, для чего необходима затрата энергии. Кинетическая энергия магнита и энергия тока возникали бы из ничего, без затраты энергии.

При удалении магнита, наоборот, в соответствии с законом сохранения энергии требуется, чтобы появилась сила притяжения.

Справедливость этого вывода можно продемонстрировать на опыте, показанном на рисунке 242. На концах стержня, свободно вращающегося вокруг вертикальный оси, закреплены два проводящих алюминиевых кольца. Одно из них с разрезом. Если поднести магнит к кольцу без разреза, то в нем возникнет индукционный ток и направлен он будет так, что кольцо оттолкнется от магнита и стержень повернется. Если удалять магнит от кольца, то оно, наоборот, притянется к магниту. С разрезанным кольцом магнит не взаимодействует, так как разрез препятствует возникнове-

Рис. 242



нию в кольце индукционного тока. Отталкивание или притяжение магнита катушкой зависит от направления индукционного тока. Поэтому закон сохранения энергии позволяет сформулировать правило, определяющее направление индукционного тока.

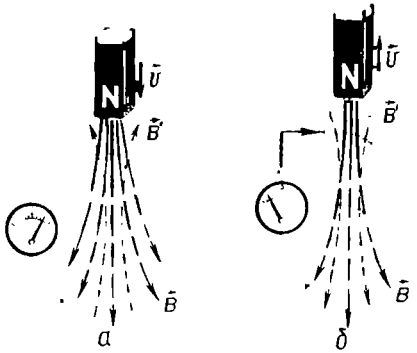


Рис. 243

В чем состоит различие двух опытов: приближение магнита к катушке и его удаление? В первом случае число линий магнитной индукции, пронизывающих витки катушки, или, что то же самое, магнитный поток, увеличивается (рис. 243, *а*), а во втором случае — уменьшается (рис. 243, *б*). Причем в первом случае линии магнитной индукции выходят из верхнего конца катушки, так как катушка отталкивает магнит, а во втором случае, наоборот, входят в этот конец. Эти линии магнитной индукции на рисунке 243 изображены пунктиром.

Правило Ленца. Теперь мы подошли к главному: при увеличении магнитного потока через витки катушки индукционный ток имеет такое направление, что создаваемое им магнитное поле препятствует нарастанию магнитного потока через витки катушки. Ведь вектор индукции этого поля $\vec{B}'$ направлен против вектора индукции $\vec{B}$, порождающего электрический ток. Если же магнитный поток через катушку ослабевает, то индукционный ток создает магнитное поле с индукцией $\vec{B}'$, увеличивающей магнитный поток через витки катушки.

В этом состоит существо общего правила определения направления индукционного тока, которое применимо во всех случаях. Это правило было установлено русским физиком Ленцем.

Согласно правилу Ленца **возникающий в замкнутом контуре индукционный ток имеет такое направление, что созданный им магнитный поток через площадь, ограниченную контуром, стремится компенсировать то изменение магнитного потока, которое вызывает данный ток.**

93. ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Сформулируем закон электромагнитной индукции количественно. Опыты Фарадея показали, что сила индукционного тока I_i в проводящем контуре пропорциональна скорости изменения числа линий магнитной индукции $\vec{B}$, пронизывающих площадь, ограниченную этим контуром. Более точно это утверждение можно сформулировать, используя понятие магнитного потока.

Магнитный поток наглядно истолковывается как число линий магнитной индукции, пронизывающих поверхность площадью S. Поэтому скорость изменения этого числа есть не что иное, как скорость изменения магнитного потока.

Если за малое время Δt магнитный поток меняется на $\Delta\Phi$, то скорость изменения магнитного потока равна $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$. Поэтому утверждение, которое вытекает непосредственно из опыта, можно сформулировать так: **сила индукционного тока пропорциональна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром:**

$$I_i \sim \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \qquad (12.1)$$

ЭДС индукции. Известно, что в цепи появляется электрический ток в том случае, когда на свободные заряды проводника действуют сторонние силы. Работу этих сил при перемещении единичного положительного заряда вдоль замкнутого контура называют электродвижущей силой. Следовательно, при изменении магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, в нем появляются сторонние силы, действие которых характеризуется ЭДС, называемой ЭДС индукции. Обозначают ее буквой $\mathcal{E}_i$.

Согласно закону Ома для замкнутой цепи $I_i = \frac{\mathcal{E}_i}{R}$. Сопротивление проводника не зависит от изменения магнитного потока. Следовательно, выражение (12.1) справедливо только потому, что ЭДС индукции пропорциональна $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

Закон электромагнитной индукции. Закон электромагнитной индукции формулируется именно для ЭДС, а не для силы тока. При такой формулировке закон выражает сущность явления, не зависящую от свойств проводников, в которых возникает индукционный ток. Согласно закону электромагнитной индукции **ЭДС индукции в замкнутом контуре равна по модулю скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром**[1]:

$$|\mathcal{E}_i| = \left|\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\right|.$$

Как в законе электромагнитной индукции учесть направление индукционного тока (или знак ЭДС индукции) в соответствии с правилом Ленца?

---

[1] Опыт непосредственно доказывает только прямую пропорциональность между $\mathcal{E}_i$ и $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$. Но коэффициент пропорциональности можно положить равным единице, если единица измерения магнитного потока еще не установлена.

На рисунке 244 изображен замкнутый контур. Будем считать положительным направление обхода контура против часовой стрелки. Нормаль к контуру $\vec{n}$ образует правый винт с направлением обхода.

Пусть магнитная индукция $\vec{B}$ направлена вдоль нормали к контуру и возрастает со временем. Тогда $\Phi>0$ и $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}>0$.

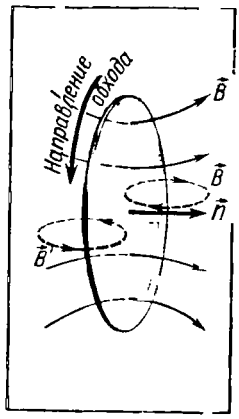


Рис. 244

Согласно правилу Ленца индукционный ток создает магнитный поток $\Phi'<0$. Линии индукции магнитного поля индукционного тока изображены на рисунке 244 пунктиром. Следовательно, индукционный ток I_i, согласно правилу буравчика, направлен по часовой стрелке (против направления положительного обхода) и ЭДС индукции отрицательна. Поэтому в законе электромагнитной индукции должен стоять знак минус, указывающий на то, что $\mathcal{E}_i$ и $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ имеют разные знаки:

$$\mathcal{E}_i=-\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \qquad (12.2)$$

Измерение магнитной проницаемости железа. Явление электромагнитной индукции можно использовать для измерения магнитной проницаемости железа и других ферромагнетиков.

ЭДС индукции пропорциональна скорости изменения магнитного потока, пронизывающего катушку. Если вставить в длинную катушку железный сердечник, то магнитная индукция согласно формуле (11.10) увеличится в μ раз. Следовательно, во столько же раз увеличится магнитный поток и ЭДС индукции. При размыкании цепи, питающей намагничивающую катушку постоянным током, во второй, небольшой катушке, намотанной поверх основной, возникает индукционный ток, регистрируемый гальванометром (рис. 245, *а*). Если в катушку вставлен железный сердечник, то отклонение стрелки гальванометра будет в μ раз больше (рис. 245, *б*). Измерения показывают, что магнитный поток при внесении в катушку железного сердечника может увеличиваться в тысячи раз. Следовательно, магнитная проницаемость железа огромна.

Единицы магнитной индукции и магнитного потока. В международной системе единиц закон электромагнитной индукции используют для установления единицы магнитного потока. Эту единицу называют в е б е р о м (Вб).

Так как ЭДС индукции $\mathcal{E}_i$ измеряют в вольтах, а время — в секундах, то согласно (12.2) вебер можно определить следующим образом: **магнитный поток через площадь, ограниченную**

Рис. 245 *а* *б*

замкнутым контуром, равен 1 Вб, если при равномерном убывании этого потока до нуля за 1 с в контуре возникает ЭДС индукции 1 В. 1 Вб = 1 В·1 с.

Единицу магнитной индукции устанавливают на основе соотношения (11.2). Если вектор $\vec{B}$ перпендикулярен поверхности S, то $\Phi = BS$. Отсюда магнитная индукция равна единице, если она создает через площадь 1 м^2 магнитный поток в 1 Вб.

Эту единицу магнитной индукции называют тесла (Тл).

$$1\ \text{Тл} = 1\ \text{Вб/м}^2 = 1\frac{\text{В·с}}{\text{м}^2} = 1\frac{\text{Дж·с}}{\text{Кл·м}^2} = 1\frac{\text{Н}}{\text{А·м}}.$$

1. В чем состоит явление электромагнитной индукции? 2. Как определяется направление индукционного тока? 3. Как формулируется закон электромагнитной индукции?

94. ВИХРЕВОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

ЭДС индукции возникает либо в неподвижном проводнике, помещенном в изменяющееся во времени поле, либо в проводнике, движущемся в магнитном поле, которое может не меняться со временем. Значение ЭДС в обоих случаях определяется законом (12.2), но происхождение ЭДС различно. Рассмотрим сначала первый случай.

Пусть перед нами стоит трансформатор — две катушки, надетые на сердечник. Включив первичную обмотку в сеть, мы получим ток во вторичной обмотке (рис. 246), если она замкнута. Электроны в проводах вторичной обмотки придут в движение. Но какие силы заставляют их двигаться? Само магнитное поле, пронизывающее катушку, этого сделать не может, так как магнитное поле действует исключительно на движущиеся заряды (этим-то оно и отличается от электрического), а проводник с находящимися в нем электронами неподвижен[1].

[1] В действительности дело обстоит не так просто. И в неподвижном проводнике электроны совершают беспорядочное тепловое движение. Но средняя скорость такого движения равна нулю. Соответственно и сила тока, вызванного непосредственно магнитным полем, также должна быть равной нулю.

Кроме магнитного поля, на заряды действует еще поле электрическое. Причем оно-то может действовать и на неподвижные заряды. Но ведь то поле, о котором пока шла речь (электростатическое и стационарное поле), создается электрическими зарядами, а индукционный ток появляется под действием переменного магнитного поля. Это заставляет предположить, что **электроны в неподвижном проводнике приводятся в движение электрическим полем и это поле непосредственно порождается переменным магнитным полем.** Тем самым утверждается новое **фундаментальное свойство поля: изменяясь во времени, магнитное поле порождает электрическое поле.** К этому выводу впервые пришел Максвелл.

Теперь явление электромагнитной индукции предстает перед нами в новом свете. Главное в нем — это процесс порождения магнитным полем поля электрического. При этом наличие проводящего контура, например катушки, не меняет существа дела. Проводник с запасом свободных электронов (или других частиц) лишь позволяет обнаружить возникающее электрическое поле. Поле приводит в движение электроны в проводнике и тем самым обнаруживает себя. Сущность явления электромагнитной индукции в неподвижном проводнике состоит не столько в появлении индукционного тока, сколько в возникновении электрического поля, которое приводит в движение электрические заряды.

Возникающее при изменении магнитного поля электрическое поле имеет совсем другую структуру, чем электростатическое. Оно не связано непосредственно с электрическими зарядами, и его линии напряженности не могут на них начинаться и кончаться. Они вообще нигде не начинаются и не кончаются, а представляют собой замкнутые линии, подобные линиям индукции магнитного поля. Это так называемое вихревое электрическое поле (рис. 247).

Направление его силовых линий совпадает с направлением индукционного тока. Сила, действующая со стороны вихревого электрического поля на заряд q_0, по-прежнему равна: $\vec{F}=q_0\vec{E}$. Но в отличие от стационарного электрического поля работа вихревого поля на замкнутом пути не равна нулю. Ведь при перемещении заряда вдоль замкнутой линии напряженности элек-

Рис. 246

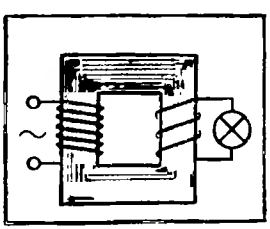


Рис. 247

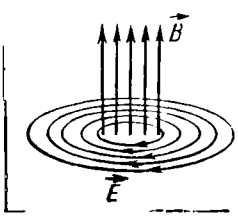
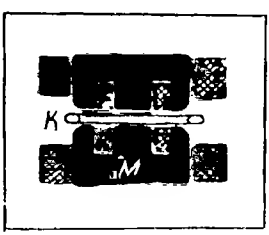


Рис. 248



трического поля (рис. 247) работа на всех участках пути будет иметь один и тот же знак, так как сила и перемещение совпадают по направлению. **Работа вихревого электрического поля по перемещению единичного положительного заряда на замкнутом пути представляет собой ЭДС индукции в неподвижном проводнике.**

Бетатрон. При быстром изменении магнитного поля сильного электромагнита появляются мощные вихри электрического поля, которые можно использовать для ускорения электронов до скоростей, близких к скорости света. На этом принципе основано устройство ускорителя электронов — б е т а т р о н а. Электроны в бетатроне ускоряются вихревым электрическим полем внутри кольцевой вакуумной камеры K, помещенной в зазоре электромагнита M (рис. 248).

95. ЭДС ИНДУКЦИИ В ДВИЖУЩИХСЯ ПРОВОДНИКАХ

Если проводник движется в постоянном по времени магнитном поле, то ЭДС индукции в проводнике обусловлена не вихревым электрическим полем, а другой причиной.

При движении проводника его свободные заряды движутся вместе с ним. Поэтому на заряды со стороны магнитного поля будет действовать сила Лоренца. Она-то и вызывает перемещение зарядов внутри проводника. ЭДС индукции, следовательно, имеет «магнитное происхождение».

На многих электростанциях земного шара именно сила Лоренца вызывает перемещение электронов в движущихся проводниках.

Вычислим ЭДС индукции в прямоугольном контуре, помещенном в однородное магнитное поле (рис. 249). Пусть сторона контура $|MN|=l$ скользит с постоянной скоростью $\vec{v}$ вдоль сторон NC и MD, оставаясь все время параллельной стороне CD. Вектор магнитной индукции $\vec{B}$ однородного поля перпендикулярен проводнику MN и составляет угол α с направлением его скорости.

Сила, с которой магнитное поле действует на движущуюся заряженную частицу (см. § 89), равна по модулю:

$$F_L = |q_0| vB \sin\alpha. \qquad (12.3)$$

Направлена эта сила вдоль проводника MN. Работа силы Лоренца на пути l составляет[1]:

$$A = F_L l = |q_0| vBl \sin\alpha.$$

Электродвижущая сила индукции в проводнике MN представля-

[1] Это неполная работа силы Лоренца. Кроме того, имеется составляющая силы Лоренца, направленная против скорости проводника $\vec{v}$. Эта составляющая совершает отрицательную работу.

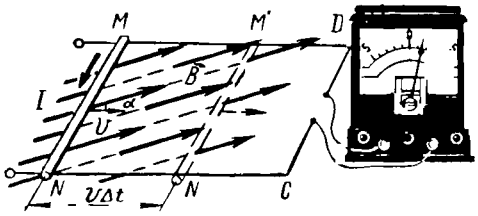


Рис. 249

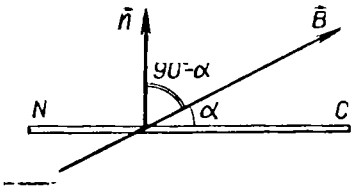


Рис. 250

ет собой отношение работы по перемещению заряда q_0 к этому заряду:

$$\mathcal{E} = \frac{A}{q_0} = vBl\sin\alpha. \qquad (12.4)$$

Эта формула справедлива для любого проводника длиной l, движущегося со скоростью $\vec{v}$ в однородном магнитном поле.

В других проводниках контура ЭДС равна нулю, так как проводники неподвижны. Следовательно, ЭДС во всем контуре $MNCD$ равна $\mathcal{E}$, и остается неизменной, если скорость движения v постоянна. Электрический ток при этом будет увеличиваться, так как при смещении проводника MN вправо уменьшается общее сопротивление контура.

С другой стороны, ЭДС индукции можно вычислить с помощью закона электромагнитной индукции (12.2). Действительно, магнитный поток через контур $MNCD$ равен:

$$\Phi = BS\cos(90° - \alpha) = BS\sin\alpha,$$

где угол $90° - \alpha$ есть угол между вектором $\vec{B}$ и нормалью $\vec{n}$ к поверхности контура (рис. 250), а S — площадь контура $MNCD$. Если считать, что в начальный момент времени ($t=0$) проводник MN находится на расстоянии NC от проводника CD (рис. 249), то при перемещении проводника площадь S изменяется со временем следующим образом:

$$S = |MN|(|NC| - vt).$$

За время Δt площадь контура меняется на $\Delta S = -lv\Delta t$. Знак минус указывает на то, что она уменьшается. Изменение магнитного потока за это время равно $\Delta\Phi = -Blv\Delta t\sin\alpha$. Следовательно,

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = Blv\sin\alpha,$$

как это и было получено выше (см. формулу 12.4).

Если весь контур $MNCD$ движется в однородном магнитном поле, сохраняя свою ориентацию по отношению к вектору $\vec{B}$, то ЭДС индукции в контуре будет равна нулю, так как поток Φ через площадь, ограниченную контуром, не меняется. Объяснить

это можно так. При движении контура в проводниках MN и CD возникают силы (12.3), действующие на электроны в направлениях от N к M и от C к D. Суммарная работа этих сил при обходе контура по часовой стрелке или против нее равна нулю.

1. Какова природа сторонней силы, вызывающей появление индукционного тока в неподвижном проводнике? **2.** В чем отличие вихревого электрического поля от электростатического или стационарного? **3.** Какова природа сторонней силы, вызывающей появление индукционного тока в движущемся проводнике?

96. САМОИНДУКЦИЯ. ИНДУКТИВНОСТЬ

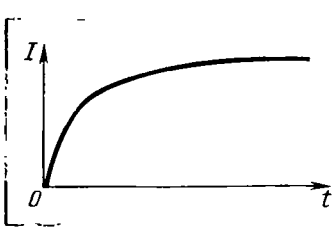
Самоиндукция. Если по катушке идет переменный ток, то магнитный поток, пронизывающий катушку, меняется. Поэтому возникает ЭДС индукции в том же самом проводнике, по которому идет переменный ток. Это явление называют самоиндукцией. При самоиндукции проводящий контур играет двоякую роль: по нему протекает ток, вызывающий индукцию, и в нем же появляется ЭДС индукции. *Изменяющееся магнитное поле индуцирует ЭДС в том самом проводнике, по которому течет ток, создающий это поле.*

По правилу Ленца в момент нарастания тока напряженность вихревого электрического поля направлена против тока. Следовательно, в этот момент вихревое поле препятствует нарастанию тока. Наоборот, в момент уменьшения тока вихревое поле поддерживает его.

Это приводит к тому, что при замыкании цепи, содержащей постоянную ЭДС, определенное значение силы тока устанавливается не сразу, а постепенно, с течением времени (рис. 251). С другой стороны, при отключении источника ток в замкнутых контурах прекращается не мгновенно. Возникающая ЭДС самоиндукции может превышать ЭДС источника, так как изменение тока и его магнитного поля при отключении источника происходит очень быстро.

Явление самоиндукции можно наблюдать на простых опытах. На рисунке 252 показана схема параллельного включения двух одинаковых ламп. Одну из них подключают к источнику через резистор сопротивлением R, а вторую — последовательно катушке L с железным сердечником.

Рис. 251



При замыкании ключа первая лампа вспыхивает практически сразу, а вторая — с заметным запозданием. ЭДС самоиндукции в цепи этой лампы велика, и сила тока не сразу достигает своего максимального значения.

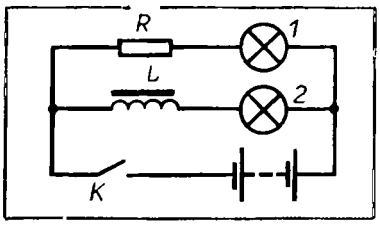


Рис. 252

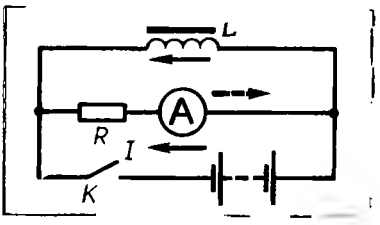


Рис. 253

Схема цепи, позволяющей наблюдать появление ЭДС самоиндукции при размыкании, показана на рисунке 253. При размыкании ключа K в катушке L возникает ЭДС самоиндукции, поддерживающая первоначальный ток. В результате в момент размыкания через гальванометр течет ток (пунктирная стрелка), направленный против начального тока до размыкания (сплошная стрелка). Сила тока при размыкании цепи может превосходить силу тока, проходящего через гальванометр при замкнутом ключе K. Это означает, что $\mathcal{E}_{is} > \mathcal{E}$ батареи элементов.

Аналогия между самоиндукцией и инерцией. Явление самоиндукции подобно явлению инерции в механике. Так, инерция приводит к тому, что под действием силы тело не мгновенно приобретает определенную скорость, а постепенно. Тело нельзя мгновенно затормозить, как бы велика ни была тормозящая сила. Точно так же за счет самоиндукции при замыкании цепи сила тока не сразу приобретает определенное значение, а нарастает постепенно. Выключая источник, мы не прекращаем ток сразу. Самоиндукция его поддерживает некоторое время, несмотря на наличие сопротивления цепи.

Далее, чтобы увеличить скорость тела, согласно законам механики нужно совершить работу. При торможении тело само совершает работу. Точно так же для создания тока нужно совершить работу против вихревого электрического поля, а при исчезновении тока это поле само совершает положительную работу

Индуктивность. Модуль B магнитной индукции, создаваемой током, пропорционален силе тока. Так как магнитный поток Φ пропорционален B, то $\Phi \sim B \sim I$.

Можно, следовательно, утверждать, что

$$\boxed{\Phi = LI,} \qquad (12.5)$$

где L — коэффициент пропорциональности между током в проводящем контуре и созданным им магнитным потоком, пронизывающим этот контур Величину L называют индуктивностью контура или его коэффициентом самоиндукции.

Используя закон электромагнитной индукции и выражение (12.5), получим равенство:

$$\mathcal{E}_{is} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}, \qquad (12.6)$$

если считать, что форма контура остается неизменной и поток меняется только за счет изменения тока.

Из формулы (12.6) следует, что **индуктивность — это физическая величина, численно равная ЭДС самоиндукции, возникающей в контуре при изменении силы тока на 1 А за 1 с.**

Индуктивность, подобно электроемкости, зависит от геометрических факторов: от размеров проводника и его формы, но не зависит непосредственно от силы тока в проводнике. Кроме геометрии проводника, индуктивность зависит от магнитных свойств среды, в которой находится проводник.

Единицу индуктивности в СИ называют генри (обозначается Гн). Индуктивность проводника равна 1 Гн, если в нем при изменении силы тока на 1 А за 1 с возникает ЭДС самоиндукции 1 В:

$$1\ \text{Гн} = \frac{1\ \text{В}}{1\frac{\text{А}}{\text{с}}} = 1\frac{\text{В}\cdot\text{с}}{\text{А}}.$$

97. ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТОКА

Найдем энергию, которой обладает электрический ток в проводнике. Согласно закону сохранения энергии энергия тока равна той энергии, которую должен затратить источник тока (гальванический элемент, генератор на электростанции и др.) на создание тока. При прекращении тока эта энергия выделяется в той или иной форме.

При замыкании цепи, содержащей постоянную ЭДС, энергия источника тока первоначально расходуется на создание тока, т. е. на приведение в движение электронов проводника и образование связанного с током магнитного поля, а также отчасти на увеличение внутренней энергии проводника, т. е. на его нагревание. После того как установится постоянное значение силы тока, энергия источника расходуется исключительно на выделение теплоты. Энергия тока при этом уже не изменяется.

Точно так же, для того чтобы разогнать автомашину на горизонтальном участке пути до постоянной скорости v, нужно совершить работу $\frac{mv^2}{2}$. Часть мощности двигателя при этом тратится на преодоление трения, а часть — на увеличение скорости машины. При $v=\text{const}$ вся мощность двигателя расходуется на преодоление трения, а кинетическая энергия машины не меняется.

Выясним теперь, почему же для создания тока необходимо

затратить энергию, т. е. необходимо совершить работу. Объясняется это тем, что при замыкании цепи, когда ток начинает нарастать, в проводнике появляется вихревое электрическое поле, направленное против того электрического поля[1], которое создается в проводнике благодаря источнику тока. Для того чтобы сила тока стала равной I, источник тока должен совершить работу против сил вихревого поля. Эта работа и идет на увеличение энергии магнитного поля тока.

Рис. 254

При размыкании цепи ток исчезает и вихревое поле совершает положительную работу. Запасенная током энергия выделяется. Это обнаруживается по мощной искре, возникающей при размыкании цепи с большой индуктивностью (рис. 254).

Записать выражение для энергии тока I, текущего по цепи с индуктивностью L, можно на основании аналогии между инерцией и самоиндукцией, о которой говорилось в § 96.

Если самоиндукция аналогична инерции, то индуктивность в процессе создания тока должна играть ту же роль, что и масса при увеличении скорости тела в механике. Роль скорости тела в электродинамике играет сила тока I, как величина, характеризующая движение электрических зарядов.

Если это так, то энергию тока $W_м$ можно считать величиной, подобной кинетической энергии тела $\frac{mv^2}{2}$ в механике, и записать в виде:

$$W_м = \frac{LI^2}{2}. \qquad (12.7)$$

Именно такое выражение для энергии тока и получается в результате расчетов.

Энергия тока (12.7) выражена через геометрическую характеристику проводника L и силу тока в нем I. Но эту же энергию можно выразить и через характеристики поля. Вычисления показывают, что плотность энергии магнитного поля (т. е. энергия единицы объема) пропорциональна квадрату магнитной индукции подобно тому как плотность энергии электрического поля пропорциональна квадрату напряженности электрического поля.

1. Что называют самоиндукцией? 2. Как направлено по отношению к направлению тока вихревое электрическое поле в проводнике при увеличении и уменьшении силы тока? 3. Что называют индуктивностью провод-

[1] Это электрическое поле создают заряженные частицы на поверхности проводника, в отличие от вихревого поля, порождаемого переменным магнитным полем.

ника? 4. В каких единицах измеряется индуктивность? 5. Чему равна ЭДС самоиндукции? 6. Почему для создания тока источник должен затратить энергию? 7. Чему равна энергия электрического тока?

98. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ И ИХ ТЕХНИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Многочисленные технические применения электродинамики основаны в первую очередь на том, что электрическую энергию легко передавать по проводам на большие расстояния, распределять между потребителями и, главное, с помощью сравнительно несложных устройств превращать в любые другие виды энергии: механическую, внутреннюю, энергию света и т. д.

Электроэнергия вырабатывается на тепловых электростанциях, гидростанциях и атомных электростанциях. Затем она по линиям передачи в сотни и тысячи километров поступает на промышленные предприятия, транспорт (электрическая тяга) и в дома для освещения и приведения в действие разнообразных электроприборов: холодильников, стиральных машин, электробритв, радиоприемников, проигрывателей, магнитофонов и телевизоров. Розетки на стенах квартир образуют своеобразную «среду обитания» современного человека, к которой мы так привыкли, что ее удивительные возможности уже перестали замечать.

Создание мощных электростанций, производящих дешевую электроэнергию, и многочисленных устройств, потребляющих ее, оказалось возможным только благодаря нашему знанию законов электродинамики. Открытие закона электромагнитной индукции и других законов электродинамики неожиданно связало теорию с огромным числом практических применений.

Действие всех генераторов электростанций основано на законе электромагнитной индукции. Первоначально Фарадей обнаружил лишь едва заметный ток в катушке при движении вблизи нее магнита. «Какая от этого польза?» — спросили его. Фарадей ответил: «Какая может быть польза от новорожденного?» Прошло немногим более половины столетия и, по словам американского физика Р. Фейнмана, «бесполезный новорожденный превратился в чудо-богатыря и изменил облик Земли так, как его гордый отец не мог себе и представить».

Вместо простой катушки и магнита современный генератор представляет собой внушительное сооружение из медных проводов, железа, изоляционных материалов и стальных конструкций. При размерах в несколько метров важнейшие детали генераторов изготовляются с точностью до миллиметра. Нигде в природе нет такого сочетания движущихся частей, которые могли бы порождать электрическую энергию столь же непрерывно и экономично.

Потоки электроэнергии от электростанций преобразуются и затем дробятся на части с помощью устройств, опять же осно-

ванных на электромагнитной индукции. Это трансформаторы — две катушки на железном сердечнике[1]. Большая часть этой энергии поступает в электродвигатели, начиная от огромных двигателей прокатных станов и кончая крошечными моторчиками электробритв. Электродвигатели, как и генераторы,— это сложные, технически совершенные устройства, работающие долговечно, безотказно и очень экономично. Действие электродвигателей основано на законе Ампера, без знания которого сконструировать и построить эти двигатели невозможно.

Значительная часть электроэнергии идет на нагревание проводников. Широко используется это действие тока в металлургии, при обработке металлов, электросварке и т. д. В лампах накаливания электрический ток нагревает до высокой температуры тонкие вольфрамовые нити. В основе расчетов нагревательных приборов лежит закон Джоуля — Ленца, открытый в то время, когда о широком применении электрического тока для практических целей еще не начали и мечтать.

Без знания закона Ома, определяющего силу тока, невозможно рассчитать электрическую цепь, правильно сконструировать ни один электрический прибор. Ведь именно от силы тока зависят механические, тепловые и химические действия тока.

Генераторы, производящие электроэнергию, и устройства, потребляющие ее, должны делать это очень экономично. Никакие лишние потери недопустимы. Потеря одного лишь процента электроэнергии в нашей стране — это не мелочь, а огромный ущерб.

Наиболее сложные и тонкие проявления законов электродинамики используются в радиотехнике для передачи голоса, музыки и изображения на расстояния, а также в быстродействующих вычислительных машинах, автоматических устройствах исключительной точности и надежности. Об этом будет рассказано при изучении физики в X классе.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

При решении задач на материал данной главы нужно уметь определять направление индукционного тока с помощью правила Ленца. ЭДС индукции вычисляется с помощью закона электромагнитной индукции (12.2) или (в случае движения проводника в магнитном поле) с помощью формулы (12.4). ЭДС самоиндукции вычисляется по формуле (12.6), а энергия тока — по формуле (12.7). Для решения некоторых задач надо применять силу Ампера (11.4).

[1] Электрический ток, производимый на электростанциях и поступающий к потребителям, является не постоянным, а переменным. Переменный ток будет подробно изучаться в X классе.

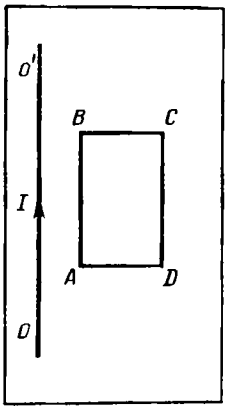


Рис. 255

1. Прямоугольный контур *ABCD* перемещается поступательно в магнитном поле тока, текущего по прямолинейному длинному проводнику (рис. 255). Определить направление тока, индуцированного в контуре, если контур удаляется от провода. Какие силы действуют на рамку?

Решение. При движении контура в указанном направлении магнитный поток через площадь *ABCD* убывает. Следовательно, в контуре установится ток, который в соответствии с правилом Ленца будет направлен по часовой стрелке. Именно при этом направлении тока его магнитный поток складывается с потоком, созданным током, текущим по прямолинейному проводнику.

Взаимодействие тока в контуре с прямолинейным током приводит к появлению сил, действующих на проводники контура. Применив правило левой руки, можно выяснить, что эти силы, во-первых, растягивают рамку, стремясь увеличить площадь контура, и, во-вторых, создают результирующую силу, направленную к прямолинейному проводнику. Оба действия «стремятся» воспрепятствовать уменьшению магнитного потока через контур.

2. Катушка из *N* витков, площадь каждого из которых равна *S*, присоединена к баллистическому гальванометру. (Баллистический гальванометр измеряет прошедший через него электрический заряд.) Сопротивление всей цепи равно *R*. Вначале катушка находилась между полюсами магнита в области, где магнитное поле однородно и индукция поля $\vec{B}$ направлена перпендикулярно виткам катушки. Затем катушку переместили в пространство, где магнитное поле отсутствует. Чему равен заряд, прошедший через гальванометр?

Решение. На основании закона электромагнитной индукции и закона Ома заряд, прошедший через гальванометр, равен:

$$\Delta q = I\Delta t = \frac{\mathcal{E}}{R}\Delta t = -\frac{1}{R}\Delta\Phi = -\frac{\Phi - \Phi_0}{R}.$$

Здесь $\Phi_0 = BSN$ — начальный магнитный поток, а $\Phi = 0$ — конечный магнитный поток. Следовательно,

$$\Delta q = \frac{BSN}{R}.$$

Упр. 15

1. Ключ (в схеме на рисунке 238) только что замкнули. Ток в нижней катушке направлен против часовой стрелки, если смотреть сверху. Каково направление тока в верхней катушке при условии, что она неподвижна?

2. Магнит (рис. 240, б) выдвигают из катушки. Определить направление индукционного тока в катушке.

3. Определить направление индукционного тока в сплошном кольце, к которому подносят магнит (рис. 242).

4. Сила тока в проводнике OO' (рис. 255) убывает. Найти направление индукционного тока в неподвижном контуре $ABCD$ и направления сил, действующих на каждую из сторон контура.

5. Металлическое кольцо может свободно двигаться по сердечнику катушки, включенной в цепь постоянного тока (рис. 256). Что будет происходить в моменты замыкания и размыкания цепи?

6. Сила тока в катушке нарастает прямо пропорционально времени. Каков характер зависимости силы тока от времени в другой катушке, индуктивно связанной с первой?

7. В каком случае колебания стрелки магнитоэлектрического прибора затухают быстрее: когда клеммы прибора замкнуты накоротко или когда разомкнуты?

8. Магнитный поток через контур проводника с сопротивлением $3 \cdot 10^{-2}$ Ом за 2 с изменился на $1{,}2 \cdot 10^{-2}$ Вб. Какова сила тока, протекавшего по проводнику, если изменение потока происходило равномерно?

9. Самолет летит горизонтально со скоростью 900 км/ч. Найти разность потенциалов, возникающую между концами его крыльев, если модуль вертикальной составляющей магнитной индукции земного магнитного поля $5 \cdot 10^{-5}$ Тл, а размах крыльев 12 м.

10. В катушке с индуктивностью 0,15 Гн и очень малым сопротивлением r установилась сила тока 4 А. Параллельно катушке присоединили резистор сопротивлением $R \gg r$. Какое количество теплоты выделится в катушке и в резисторе после быстрого отключения источника тока?

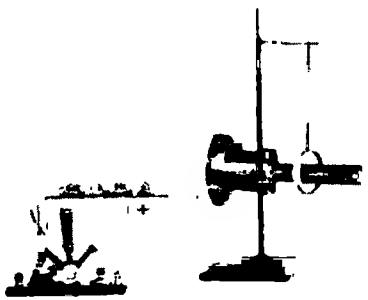
КРАТКИЕ ИТОГИ ГЛАВЫ XII

Явление электромагнитной индукции, открытое Фарадеем, состоит в возникновении ЭДС индукции в замкнутом контуре при изменении магнитного потока через площадь, ограниченную этим контуром. Это явление лежит в основе работы генераторов всех электростанций мира. Согласно закону электромагнитной индукции, ЭДС индукции в замкнутом контуре равна скорости изменения магнитного потока, взятой со знаком минус:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Здесь $\Phi = B_n S$ — поток магнитной индукции через площадь контура S; B_n — проекция вектора магнитной индукции на нормаль к контуру. Знак минус обусловлен правилом Ленца, определяющим направление индукционного тока: индукционный ток в замкнутом контуре имеет такое направление, что созданный им магнитный поток через площадь, ограниченную

Рис. 256



контуром, стремится компенсировать то изменение магнитного потока, которое порождает данный ток.

В неподвижном проводнике сторонней силой, действующей на заряды, является вихревое электрическое поле, порождаемое переменным магнитным полем. В движущемся проводнике сторонней силой является магнитная сила Лоренца, действующая на движущиеся вместе с проводником заряженные частицы.

Важным частным случаем электромагнитной индукции является самоиндукция. При самоиндукции изменяющееся магнитное поле индуцирует ЭДС в том самом проводнике, по которому течет ток, создающий это поле.

ЭДС самоиндукции прямо пропорциональна скорости изменения силы тока в проводнике: $\mathcal{E}_{is} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$.

Коэффициент пропорциональности L называется индуктивностью. Индуктивность зависит от размеров и формы проводника, а также от свойств среды, в которой находится проводник. Измеряется она в генри: $1\ \text{Гн} = 1\ \frac{\text{В}\cdot\text{с}}{\text{А}}$.

Энергия магнитного поля тока $W_м = \frac{LI^2}{2}$ равна той работе, которую должен совершить источник, чтобы создать данный ток.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение электродинамики не заканчивается знакомством с явлением электромагнитной индукции. Мы рассмотрели пока лишь электромагнитные явления в случае неподвижных электрических зарядов (постоянное электрическое поле) и зарядов, движущихся с постоянной скоростью (постоянное магнитное поле). Только в главе «Электромагнитная индукция» мы приступили к знакомству с переменным по времени электромагнитным полем. Очень обширная, наиболее интересная и практически наиболее важная область переменных и быстропеременных электромагнитных явлений осталась нерассмотренной.

В X классе, опираясь на знание тех фундаментальных законов электродинамики, которые уже изучены, вы сначала познакомитесь со свойствами, получением и применением переменного электрического тока. Затем узнаете еще об одном фундаментальном свойстве электромагнитного поля — порождении магнитного поля переменным электрическим полем (явлении, обратном электромагнитной индукции). После этого вы перейдете к изучению быстропеременных электромагнитных полей и электромагнитных волн. Лишь тогда знакомство с электродинамикой можно считать законченным и полная картина электромагнитных процессов в природе в общих чертах станет вам известной.

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

1. ОПЫТНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ЗАКОНА БОЙЛЯ—МАРИОТТА

Приборы и материалы: трубка стеклянная длиной 300 –350 мм, диаметром 8—10 мм, запаянная с одного конца, сосуд цилиндрический (диаметром 40—50 мм, длиной 350– 400 мм или стеклянная трубка, закрытая снизу пробкой), линейка измерительная с миллиметровыми делениями, штатив, барометр (один на весь класс).

Указания к работе. 1. Наполнить укрепленный на штативе цилиндрический сосуд водой.

2. Измерить при помощи барометра атмосферное давление.

3. Измерить объем воздуха в стеклянной трубке (в условных единицах по делениям линейки).

4. Найти произведение давления воздуха на его объем.

5. Погрузить стеклянную трубку в воду запаянным концом вверх.

6. Измерить новый объем воздуха в трубке.

7. Измерить разность уровней воды в сосуде и трубке.

8. Рассчитать новое давление воздуха в трубке.

9. Вычислить произведение давления воздуха на его объем.

10. Повторить эксперимент несколько раз.

11. Результаты измерений занести в таблицу.

Номер опыта	Давление p	Объем V	Произведение pV

Сравнить полученные результаты и убедиться в справедливости закона Бойля—Мариотта.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Приборы и материалы: весы с гирями, стакан, штатив, пробирка с песком, штангенциркуль или измерительная линейка с миллиметровыми делениями, лист бумаги, проволочка или проволочная рамка на нитях (рис. 257).

Указания к работе. 1. Зажать весы в лапке штатива.

2. Привязать к одной из чашек весов нить с подвешенной проволочкой или рамкой и уравновесить весы песком (песок сыпать на лист бумаги, положенный на чашку).

3. Добиться горизонтального положения проволочки или рамки.

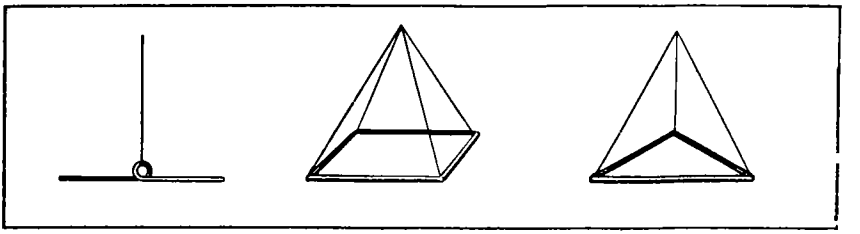


Рис. 257

4. Под чашкой установить стакан с дистиллированной водой так, чтобы поверхность воды находилась от проволочки на расстоянии 1—2 см.

5. Осторожно опустить проволочку или рамку так, чтобы она, коснувшись поверхности воды, «прилипла» к ней.

6. Очень осторожно добавлять песок до «отрыва» проволочки или рамки с поверхности воды.

7. Осушить проволочку или рамку фильтровальной бумагой и вновь уравновесить весы, но уже при помощи гирь.

8. Измерить штангенциркулем или масштабной линейкой длину проволочки (периметр рамки).

9. Вычислить коэффициент поверхностного натяжения воды по формуле

$$\sigma = \frac{mg}{2l},$$

где m — масса гирь, g — ускорение свободного падения, l — длина проволочки или периметр рамки.

10. Повторить измерение несколько раз и найти среднее значение коэффициента поверхностного натяжения. Сравнить полученный результат с табличным значением.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ РЕЗИНЫ

Приборы и материалы: штатив, чашечка от лабораторного трибометра, гири, штангенциркуль или микрометр, линейка измерительная с миллиметровыми делениями, два резиновых шнура различного сечения длиной около 40 см.

Указания к работе. 1. Подвесить один из резиновых шнуров за конец на штативе.

2. Прикрепить к нижнему концу шнура чашечку для грузов.

3. Нанести на среднем участке шнура карандашом или чернилами две тонкие метки на расстоянии приблизительно 20 см друг от друга.

4. Измерить начальное расстояние l_0 между метками.

5. Измерить диаметр шнура между метками (не сжимая резины) и рассчитать площадь S его поперечного сечения.

6. Нагрузить чашечку гирями, записать их вес F и, выждав, пока не закончится растяжение шнура, измерить расстояние l между метками.

7. Проделать то же, постепенно увеличивая нагрузку до максимальной, а затем уменьшая ее. Для каждой нагрузки определить абсолютное удлинение $\Delta l = l - l_0$ резины.

8. Результаты измерений занести в таблицу:

Площадь поперечного сечения шнура, S, м^2	Деформирующая сила (нагрузка) F, Н	Длина шнура (между метками), м		Абсолютное удлинение Δl части шнура (между метками), м		
		при увеличении нагрузки	при уменьшении нагрузки	при увеличении нагрузки	при уменьшении нагрузки	среднее

9. По полученным данным построить график растяжения резины, откладывая модуль F силы по вертикальной оси, а абсолютное удлинение Δl — по горизонтальной. Сделать вывод о зависимости между этими величинами.

10. Вычислить модуль упругости E резины по формуле

$$E = \frac{l_0 F}{\Delta l \cdot S}$$

для двух значений модуля силы (в пределах прямолинейной части графика) и найти среднее значение E.

11. Повторить опыт с резиновым шнуром другого сечения и снова определить модуль упругости резины при тех же значениях силы.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭДС И ВНУТРЕННЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКА ТОКА

Приборы и материалы: источник тока (аккумулятор или батарея для карманного фонаря), реостат, амперметр, вольтметр, соединительные провода.

Указания к работе. 1. Собрать цепь, соединив последовательно батарею, реостат, амперметр и ключ.

2. К зажимам батареи присоединить вольтметр.

3. Измерить силу тока в цепи и напряжение на внешней части цепи.

4. С помощью реостата изменить сопротивление цепи и снова измерить силу тока и напряжение.

5. Результаты измерений занести в таблицу:

Сила тока I, А	Напряжение U, В	ЭДС $\mathcal{E}$, В	Внутреннее сопротивление источника r, Ом

6. Дважды используя закон Ома для замкнутой цепи $I=\frac{\mathcal{E}}{R+r}$, определить внутреннее сопротивление и ЭДС источника тока по данным измерений силы тока и напряжения. Найти сопротивление реостата при каждом измерении.

7. Разомкнуть цепь и измерить ЭДС батареи. Сравнить вычисленное значение ЭДС с измеренным.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА

Приборы и материалы: амперметр, вольтметр, лента измерительная, штангенциркуль, батарея аккумуляторов, проволока из фехраля длиной 65—70 см и диаметром 0,5 мм с металлическими наконечниками, выключатель, соединительные провода.

Указания к работе. 1. Измерить лентой длину проволоки, т. е. расстояние между металлическими наконечниками.

2. Измерить диаметр проволоки и рассчитать площадь ее поперечного сечения.

3. Собрать цепь, соединив последовательно батарею аккумуляторов, фехралевую проволоку, амперметр и ключ.

4. Параллельно проволоке включить вольтметр.

5. Замкнув ключ, измерить силу тока в цепи и напряжение на концах проволоки.

6. Используя закон Ома, рассчитать сопротивление проволоки.

7. Вычислить удельное сопротивление фехраля по формуле

$$\varrho=\frac{RS}{l},$$

где R — сопротивление проволоки, S — площадь ее поперечного сечения, l — длина.

6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ЭКВИВАЛЕНТА МЕДИ

Приборы и материалы: весы с гирями, амперметр, часы, электрическая плитка, батарея аккумуляторов, реостат, выключатель, электроды медные, цилиндрический сосуд, раствор медного купороса, соединительные провода.

Указания к работе. 1. Тщательно взвесить медный электрод, который будет служить катодом.

2. Собрать цепь, соединив последовательно батарею, амперметр, реостат, сосуд с раствором медного купороса, в который погружены электроды, ключ.

3. Замкнуть ключ, заметив время начала опыта.

4. Поддерживая с помощью реостата силу тока неизменной, произвести в течение 15—20 мин электролиз раствора.

5. Выключить ток, вынуть и обмыть электрод водой (желательно дистиллированной), затем обсушить над электроплиткой. Снова тщательно взвесить катодную пластинку.

6. Используя закон Фарадея для электролиза, определить электрохимический эквивалент меди.

7. НАБЛЮДЕНИЯ ДЕЙСТВИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ТОК

Приборы и материалы: батарея аккумуляторов, дугообразный магнит, штатив, выключатель, проволочный моток, соединительные провода.

Указания к работе. 1. Подвесить проволочный моток к штативу и через выключатель присоединить моток к батарее.

2. Поднести к висящему мотку магнит и, замыкая цепь, наблюдать движение мотка.

3. Выбрать несколько характерных вариантов относительного расположения мотка и магнита и зарисовать их, указав направление магнитного поля, направление тока и предполагаемое движение мотка.

4. Проверить на опыте правильность предположений о характере и направлении движения мотка.

8. ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Приборы и материалы: миллиамперметр, батарея аккумуляторов, катушки с сердечниками, дугообразный магнит, выключатель, соединительные провода.

Указания к работе. 1. Присоединить зажимы гальванометра к зажимам катушки.

2. Приставить сердечник к одному из полюсов дугообразного магнита и вдвинуть внутрь катушки, наблюдая одновременно за стрелкой миллиамперметра.

3. Повторить наблюдение, выдвигая сердечник из катушки, а также меняя полюсы магнита.

4. Зарисовать схему опыта и проверить выполнение правила Ленца в каждом случае.

5. Расположить вторую катушку рядом с первой так, чтобы их оси совпадали.

6. Вставить в обе катушки железные сердечники и присоединить вторую катушку через выключатель к батарее.

7. Замыкая и размыкая ключ, наблюдать отклонение стрелки гальванометра.

8. Зарисовать схему опыта и проверить выполнение правила Ленца.

ОТВЕТЫ К УПРАЖНЕНИЯМ

Упражнение 1. 1. Не более 12 м^2. **2.** $\approx 5\cdot 10^5$. **3.** 0,002 кг/моль; 0,004 кг/моль. **4.** В два раза. **5.** $\approx 0{,}056$ моль. **6.** $\approx 1{,}88\cdot 10^{21}$. **7.** $\approx 47{,}65\cdot 10^{-26}$ кг. **8.** $\approx 8{,}5\cdot 10^{28}$. **9.** $\approx 5{,}7\cdot 10^{8}$ м^3. **10.** Уменьшится в 3 раза. **11.** $5\cdot 10^9$ Па. **12.** $6\cdot 10^{-21}$ Дж. **13.** $4{,}9\cdot 10^5$ м^2/с^2.

Упражнение 2. 1. $2{,}76\cdot 10^{-23}$ Дж/К. **2.** $\approx 6\cdot 10^{21}$ Дж. **3.** $\approx 3{,}14\cdot 10^4$. **4.** Молекул больше в воздухе. **5.** $5{,}3\cdot 10^{-26}$ кг. **6.** $\approx 0{,}5\%$.

Упражнение 3. 1. 12 кПа. **2.** 20. **4.** 250 К. **6.** $\approx 0{,}0224$ м^3/моль. **8.** $\approx 5{,}8\cdot 10^{-3}$ кг/моль. **9.** $\approx 0{,}15$ м^3. **10.** $\approx 0{,}49$ кг/м^3. **13.** В 1,7 раза.

Упражнение 4. 1. Увеличится в 1,5 раза. **2.** $2{,}5\cdot 10^{-4}$ м^3. **3.** Уменьшилась **4.** $\approx 34{,}4$ Дж. **8.** $2\cdot 10^5$ Дж. **9.** $1{,}25\cdot 10^6$ Дж. **10.** 20 Дж. **12.** ≈ 10 К. **13.** $\approx 37{,}3$°С. **14.** $\approx 0{,}033$ кг. **15.** 0°С. **16.** 1500 К. **17.** 20%; $\approx 42\%$.

Упражнение 5. 4. $\approx 0{,}59$ кг/м^3. **7.** $\approx 58\%$. **8.** $\approx 0{,}92$ кг. **9.** $\approx 0{,}21$ кг.

Упражнение 6. 4. $\approx 2{,}3\cdot 10^{-5}$ Н. **6.** 800 кг/м^3.

Упражнение 7. 3. 8 мм^2. **4.** $\approx 1{,}9\cdot 10^{4}$ Н. **5.** $\approx 3{,}53\cdot 10^5$ Па. **6.** ≈ 4200 м. **7.** $4\cdot 10^{7}$ Па; $2\cdot 10^{11}$ Па. **8.** 2/3.

Упражнение 8. 3. $\approx 9{,}2\cdot 10^{-8}$ Н. **4.** $\approx 2{,}3\cdot 10^{39}$. **5.** $\approx 2{,}3\cdot 10^{6}$. **6.** $\approx 1{,}0\cdot 10^{-6}$ Н, сила притяжения; $\approx 6{,}9\cdot 10^{-7}$ Н, сила отталкивания. **7.** $\approx 1{,}1\cdot 10^{-6}$ Н, в сторону второго заряда.

Упражнение 9. 1. $\approx 1{,}5\cdot 10^{-16}$ Кл; ≈ 950 избыточных электронов. **5.** $1{,}6\cdot 10^{-19}$ Дж; $-1{,}6\cdot 10^{-19}$ Дж. **6.** $E=\dfrac{q_1^2+q_1q_2+q_2^2}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r^2}$; $\varphi=\dfrac{q_1+q_2}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r}$. **8.** 4000 В/м. **10.** $-2{,}3\cdot 10^3$ В.

Упражнение 10. 1. $\approx 0{,}1$ мкФ. **2.** $\approx 1{,}7\cdot 10^{-5}$ Кл. **3.** $\approx 1{,}7\cdot 10^{7}$ В/м. **4.** ≈ 5.5 мм. **5.** $U_1=180$ В; $U_2=120$ В. **6.** $3\cdot 10^{-7}$ Кл. **8.** Уменьшится в 3 раза. **9.** $\approx 4{,}4\times$ $\times 10^{-4}$ Дж/м^3.

Упражнение 11. 3. $\approx 1{,}4$ мм^2; $\approx 15{,}8$ м. **4.** Увеличилась в 25 раз. **5.** 5000 Ом. **6.** $\approx 4{,}9\cdot 10^{-4}$ м/с. **10.** В два раза меньше; в два раза больше. **11.** $\approx 4{,}1$ кВт; $\approx 6{,}1$ кВт. **12.** $\approx 97\%$; ≈ 1670 А.

Упражнение 12. 2. 1200 А. **3.** 3,7 В; 0,2 Ом. **4.** $\approx 0{,}33$ Вт. **6.** 4,1 В; 2,4 Ом.

Упражнение 13. 1. $\approx 2{,}9\cdot 10^{4}$ Кл. **2.** $\approx 3{,}3\cdot 10^{-7}$ кг/Кл. **4.** $\approx 3\cdot 10^{5}$ м. **6.** $\approx 1{,}33\cdot 10^{7}$ м/с; $\approx 4{,}19\cdot 10^{7}$ м/с.

Упражнение 14. 3. $1{,}5\cdot 10^{-3}$ Н·м. **4.** $1{,}2\cdot 10^{-2}$ Дж. **6.** $R=\dfrac{mv\sin\alpha}{|q|\cdot B}$.

Упражнение 15. 6. В другой катушке спустя некоторое время установится постоянный ток. **8.** 0,2 А. **9.** 0,15 В. **10.** 1,2 Дж.

Абсолютный нуль температуры 34
Авогадро 10
Ампер Андре 230
Ампер 120
Амперметр 166
Анизотропия 95

База 215
Бетатрон 250
Бойль Роберт 45
Больцман Людвиг 35
Броун Роберт 12

Вакуум 203, 204
Вебер 247, 248
Вектор магнитной индукции 223
Влажность относительная 83

Газ идеальный 19, 42
Гей-Люссак Жозеф 46
Гельмгольц Герман 61
Генератор магнитогидродинамический 173, 203
Генри 254
Гигрометр 84
Гипотеза Ампера 235

Давление газа 19, 25
— парциальное 83
Двигатель тепловой 67
Движение броуновское 12
— тепловое 3, 21
Дефекты в кристаллах 97, 98
Деформация изгиба 102
— кручения 103
— растяжения 101
— сдвига 101
— сжатия 101
Джоуль Джеймс 61
Диаграмма растяжения 104
Диод ламповый 204
— полупроводниковый 214
Диполь 138
Диссоциация электролитическая 191
Диэлектрик 136

Дуга электрическая 199
Дырка 210

Закон Ампера 229, 230
— Бойля — Мариотта 45
— Гей-Люссака 46
— Гука 15, 104
— Джоуля — Ленца 178
— Кулона 118
— Ома для участка цепи 168, 169
— — для замкнутой цепи 184
— сохранения энергии 60
— — электрического заряда 116
— термодинамики, второй 67
— термодинамики, первый 61
— Фарадея 193
— Шарля 48
— электромагнитной индукции 246, 247
Заряд электрический 112
— электрона 194
— элементарный 113
Заряды свободные 132
— связанные 136

Изобара 46
Изотерма 45
Изохора 48
Индуктивность 253
Индукция электромагнитная 241, 242
Ионизация газов 195, 197

Карно Никола 71
Кельвин У. 34
Кельвин 34
Количество вещества 10
- теплоты 58, 178
Коллектор 215
Конденсатор (эл.) 153
Конденсация 78
Коэффициент поверхностного натяжения 99
— полезного действия тепловых двигателей 70
— температурный сопротивления 171
Кулон Шарль 118
Кулон 120

Ленц Э. Х. 178, 244
Линии силовые электрического поля 130, 131
— магнитной индукции 224
Ломоносов М. В. 5

Майер Роберт 61
Максвелл Джемс 111, 126
Мандельштам Л. И. 189
Мариотт Эдм 45
Масса молекулы 9
- молекулярная относительная 9
молярная 11
Масс-спектрограф 234
Менделеев Д. И. 44
Модуль Юнга 104
Молекула, размеры 7
, средняя скорость 37
Моль 10
Моноокристаллы 96
Мощность тока 178

Напряжение, механическое 104
электрического поля 144, 176
Напряженность 128, 129

Ом Георг 169
Ом 170
Осциллограф 207

Пар насыщенный 78
— —, давление 79
Параметры макроскопические 29
Переход обратный 213
— прямой 213
Плавление 60
Плазма 201
Плазмотрон 203
Пластичность 106
Поверхности эквипотенциальные 147, 148

Поле вихревое 225, 249
-- магнитное 221
- электрическое 126, 127
— электростатическое 128
Поликристаллы 96
Полупроводники 188, 209
—, *p*—*n*-переход 212, 213
Поляризация 139
Постоянная Авогадро 10
— Больцмана 34
— газовая универсальная 42
— Фарадея 194
Потенциал 143, 144
Поток магнитный 229
Правило левой руки 232
— Ленца 245
Примеси акцепторные 212
— донорные 212
Принцип суперпозиции 129
Проводимость газов 195, 196
— дырочная 210
— ионная 191
— примесная 211
— электрическая 188
— электронная 189
Проводники 132, 133
Проницаемость диэлектрическая 139, 155
— магнитная 235
Процесс адиабатный 63
— изобарный 46, 63
— изотермический 45, 63
— изохорный 47, 63
необратимый 65, 66
Прочность 106
Психрометр 84, 85

Работа в термодинамике 55
— электрического тока 177
Равновесие тепловое 29
Разряд газовый 195, 196, 197
— искровой 200
— коронный 200
— тлеющий 199
Рамка (контур) с током 222
Рекомбинация 196

Самоиндукция 252
Сверхпроводимость 172
Сила Ампера 230, 231
— взаимодействия молекул 13
— Лоренца 232
— поверхностного натяжения 89, 90
— сторонняя 181
— тока 165
— электродвижущая 183
Сопротивление (эл.) 169, 170
— удельное 171
Состояние теплового равновесия 30
Столетов А. Г. 237
Тело аморфное 98
— кристаллическое 95
— макроскопическое 3
Температура 30
— абсолютная 34
— критическая 82
Теория молекулярно-кинетическая 5
Теплоемкость вещества удельная 59
Теплота парообразования удельная 59
— плавления удельная 60
Термистор 217
Термометр 31
— сопротивления 170
Термодинамика 5
Тесла Никола 228
Тесла 228
Ток индукционный 244
— постоянный 165
— электрический 164
Точка росы 84
Транзистор 215
Трубка электроннолучевая 207

Уравнение Менделеева — Клапейрона 43
— основное молекулярно-кинетической теории 35
— состояния 42
— теплового баланса 65

Фарад 153
Фарадей Майкл 127
Ферромагнетики 236
Фоторезистор 217, 218
Френкель Я. И. 17

Характеристика вольт-амперная 168
— диода 205
Хрупкость 107

Частицы элементарные 113

Шарль Жак 48
Шкала Кельвина 34
— Цельсия 34
Шунты к амперметру 175

Эквивалент электрохимический 193
Электризация тел 114
Электродинамика 110
Электроемкость 152
— плоского конденсатора 153
Электролиз 191
Электрометр 148
Электростатика 112
Эмиссия термоэлектронная 198
Эмиттер 215
Энергия внутренняя 53
— идеального газа 54
— потенциальная заряженного тела 141, 142
— средняя кинетическая 36
— электрического поля 158
Явления капиллярные 91, 92
— тепловые 3

ОГЛАВЛЕНИЕ

ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Введение 3

Глава I. **Основы молекулярно-кинетической теории** 6
1. Основные положения молекулярно-кинетической теории. Размеры молекул . . . —
2. Масса молекул. Число Авогадро 9
3. Броуновское движение 12
4 Силы взаимодействия молекул 13
5. Строение газообразных, жидких и твердых тел . . 15
6. Идеальный газ в молекулярно-кинетической теории . . 19
7. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов 22
Примеры решения задач . 25
Упражнение 1 . . . 27
Краткие итоги главы I . —

Глава II. **Температура. Энергия теплового движения молекул** . . . 29
8 Тепловое равновесие . . —
9. Измерение температуры . . 31
10. Абсолютная температура. Температура — мера средней кинетической энергии молекул 34
11. Измерение скоростей молекул газа . . . 37
Примеры решения задач . 40
Упражнение 2 41
Краткие итоги главы II . . —

Глава III. **Уравнение состояния идеального газа. Газовые законы** . . . 42
12. Уравнение состояния идеального газа . . . . . —
13. Применение уравнения состояния идеального газа к различным процессам . 44
14. Применения газов в технике 48
Примеры решения задач 50
Упражнение 3 52
Краткие итоги главы III 53

Глава IV. **Первый закон термодинамики** . . . . . —
15. Внутренняя энергия . . –
16. Работа в термодинамике . 55
17. Количество теплоты 58
18. Первый закон термодинамики 60
19. Применение первого закона термодинамики к различным процессам . . . 62
20. Необратимость процессов в природе 65
21. Принципы действия тепловых двигателей . . . 67
22. Коэффициент полезного действия (КПД) теплового двигателя. Тепловые двигатели и охрана природы . 70
Примеры решения задач 73
Упражнение 4 75
Краткие итоги главы IV 77

Глава V. **Взаимные превращения жидкостей и газов** . . . 78
23. Насыщенный пар . . . . —
24 Зависимость давления насыщенного пара от температуры. Кипение. Критическая температура . 80
25. Влажность воздуха . . . 83
Примеры решения задач 86
Упражнение 5 87
Краткие итоги главы V —

Глава VI. **Поверхностное натяжение жидкостей** 88
26. Поверхностное натяжение —
27. Сила поверхностного натяжения 89
28. Капиллярные явления . . . 91
Примеры решения задач 93
Упражнение 6 94
Краткие итоги главы VI —

Глава VII. **Твердые тела** . . . 95
29. Кристаллические тела . —
30. Аморфные тела . . . 98
31. Деформация. Виды деформаций твердых тел . . 100

32. Механические свойства твердых тел. Диаграмма растяжения 104
33. Пластичность и хрупкость 106
Примеры решения задач 108
Упражнение 7 109
Краткие итоги главы VII —

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

34. Что такое электродинамика? 110

Глава VIII. **Электростатика** . . 112
35. Электрический заряд и элементарные частицы . . —
36. Заряженные тела. Электризация тел . . 113
37. Закон сохранения электрического заряда . . . 116
38. Основной закон электростатики — закон Кулона 117
39. Единица электрического заряда 119
Примеры решения задач 121
Упражнение 8 . 123
40. Близкодействие и действие на расстоянии . —
41. Электрическое поле 126
42. Напряженность электрического поля. Принцип суперпозиции полей . . . 128
43. Силовые линии электрического поля 130
44. Проводники в электростатическом поле . .132
45. Напряженность электрического поля равномерно заряженного проводящего шара и бесконечной плоскости 134
46. Диэлектрики в электростатическом поле. Два вида диэлектриков . . 136
47. Поляризация диэлектриков. Диэлектрическая проницаемость 138
48. Потенциальная энергия заряженного тела в однородном электростатическом поле . 140
49. Потенциал электростатического поля и разность потенциалов . . 143
50. Потенциал электростатического поля точечного заряда . 144
51. Связь между напряженностью электрического поля и разностью потенциалов. Эквипотенциальные поверхности . . 14
52. Измерение разности потенциалов . . 148
Примеры решения задач 149
Упражнение 9 . 151
53. Электроемкость. Единицы электроемкости . 152
54. Конденсаторы. Электроемкость плоского конденсатора 153
55. Энергия заряженного конденсатора. Применения конденсаторов . . . 156
Примеры решения задач 159
Упражнение 10 . 161
Краткие итоги главы VIII —

Глава IX. **Постоянный электрический ток** . 164
56. Электрический ток. Сила тока —
57. Условия, необходимые для существования электрического тока 167
58. Закон Ома для участка цепи. Сопротивление . 168
59. Зависимость сопротивления проводника от температуры 170
60. Сверхпроводимость . . 172
61. Электрические цепи. Последовательное и параллельное соединения проводников . . 173
62. Измерение силы тока и напряжения 175
63. Работа и мощность постоянного тока . . . 177
Примеры решения задач 179
Упражнение 11 180
64. Электродвижущая сила . . 181
65. Закон Ома для замкнутой цепи . . 183
Примеры решения задач . 186
Упражнение 12 —
Краткие итоги главы IX 187

Глава X. **Электрический ток в различных средах** 188
66. Электрическая проводимость различных веществ . —
67. Электронная проводимость металлов 189
68. Электрический ток в жидкостях . 191
69. Закон электролиза . . . 192
70. Электрический ток в газах 194

71. Несамостоятельный и самостоятельный разряды 196
72. Различные типы самостоятельного разряда и их технические применения 199
73. Плазма . . . 200
74. Электрический ток в вакууме 203
75. Двухэлектродная электронная лампа диод 204
76. Электронные пучки. Электроннолучевая трубка . . 206
77 Электрический ток в полупроводниках 209
78. Электрическая проводимость полупроводников при наличии примесей . . 211
79. Электрический ток через контакт полупроводников *p* и *n*-типов . . . 212
80. Полупроводниковый диод 214
81 Транзистор 215
82. Термисторы и фоторезисторы 217
Пример решения задачи . 218
Упражнение 13 . . . 219
Краткие итоги главы X

Глава XI. **Магнитное поле** . . 220
83. Взаимодействие токов. Магнитное поле . . .
84. Вектор магнитной индукции 223
85. Линии магнитной индукции 224
86. Электроизмерительные приборы . 226
87. Модуль вектора магнитной индукции. Магнитный поток 228
88. Закон Ампера 229
89. Действие магнитного поля на движущийся заряд. Сила Лоренца . . . 232
90. Магнитные свойства вещества 235
Примеры решения задач 237
Упражнение 14 . . 239
Краткие итоги главы XI

Глава XII. **Электромагнитная индукция** 211
91. Открытие электромагнитной индукции . .
92. Направление индукционного тока. Правило Ленца 244
93. Закон электромагнитной индукции . . . 245
94. Вихревое электрическое поле 248
95. ЭДС индукции в движущихся проводниках . . 250
96. Самоиндукция. Индуктивность 252
97. Энергия магнитного поля тока 254
98. Основные законы электродинамики и их техническое применение . . . 256
Примеры решения задач 257
Упражнение 15 258
Краткие итоги главы XII 259
Заключение 260
Лабораторные работы 261
Ответы к упражнениям . 266
Предметно именной указатель 267

Борис Борисович Буховцев
Юрий Львович Климонтович
Геннадий Яковлевич Мякишев

ФИЗИКА

УЧЕБНИК
для 9 класса

Редактор **Л. Л. Величко**

Художники **О. М. Шмелев, В. А. Сайчук**

Фотограф **П. Л. Озерский**

Художественный редактор **В. М. Прокофьев**

Технический редактор **И. В. Квасницкая**

Корректоры **С. А. Щипакова, Т. С. Царикова**

ИБ № 6365

Сдано в набор 19.10.81. Подписано в печать 01.04.82. 60×90¹/₁₆. Бумага офсетная № 2. Гарнитура литературная. Печать офсетная. Усл.п.л. 17 + вкл.0,25 + форз.0,25. Усл.кр.отт. 36,06. Уч.-изд.л. 16,73 + вкл. 0,24 + форз. 0,44. Тираж 2 842 000 экз. Заказ 422. Цена 35 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Просвещение» Государственного комитета РСФСР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41.

Смоленский полиграфкомбинат Росглавполиграфпрома Государственного комитета РСФСР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. Смоленск-20, ул. Смольянинова, 1.

СВЕДЕНИЯ О ПОЛЬЗОВАНИИ УЧЕБНИКОМ

№	Фамилия и имя ученика	Учебный год	Состояние учебника	
			в начале года	в конце года
1				
2				
3				
4				
5				

Вещество	Диэлектрическая проницаемость
Воздух (при 0°С и 760 мм рт.ст.)	1,000594
Керосин	2,1
Эбонит	2,7–2,9
Кварц	4,5
Стекло	5–10
Спирт этиловый	27
Вода (чистая)	81
Сегнетова соль	10000

Вещество	Удельное сопротивление при температуре 20°С, Ом·м
Серебро	$1,6 \cdot 10^{-8}$
Медь	$1,8 \cdot 10^{-8}$
Графит	$3 \cdot 10^{-8}$
10%-ный водный раствор NaCl	0,08
Кремний	10^{3}
Вода (химически чистая)	10^{6}
Фарфор	10^{13}

Вещество	Температура перехода в сверхпроводящее состояние, К
Титан	0,4
Уран	0,8
Цинк	0,9
Алюминий	1,2
Олово	3,8
Ртуть	4,1
Свинец	7,2
Нитрат ниобия	15,2

Вещество	Температурный коэффициент сопротивлений, K^{-1}
Алюминий	$3{,}8 \cdot 10^{-3}$
Железо	$6{,}2 \cdot 10^{-3}$
Медь	$4{,}3 \cdot 10^{-3}$
Ртуть (жидк.)	$0{,}9 \cdot 10^{-3}$
Константан (40% Ni, ~ 60% Cu)	$2 \cdot 10^{-5}$
Нихром (20% Cr, 75% Ni, 5% Fe)	$1 \cdot 10^{-4}$
Фехраль (13% Cr, 4% Al, 1% Si, 0,7% Mn, остальное Fe)	$2 \cdot 10^{-4}$
Хромаль (25% Cr, 5% Al, 70% Fe)	$4 \cdot 10^{-5}$

СОВЕТСКИЕ УЧЕБНИКИ
БОЛЬШОЙ СКЛАД НА САЙТЕ
«СОЕТСКОЕ ВРЕМЯ»
SOVIETIME.RU

СКАЧАТЬ! с SOVIETIME.RU